



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia Civil



**Rotura de barragens de aterro por galgamento.
Caracterização laboratorial do hidrograma
efluente da rotura**

SOLANGE VALENTE MENDES

(Licenciada em Engenharia Civil)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Área de
Especialização em Hidráulica

Orientadores:

Mestre Alexandre Almeida Mendes Borga

Mestre Sílvia Rute Caleiro Amaral

Júri:

Presidente: Doutora Maria Helena Teixeira Cardoso Gamboa

Vogais: Mestre Alexandre Almeida Mendes Borga

Doutora Helena Margarida Machado da Silva Ramos

Janeiro 2017

À minha sobrinha, Maria.

Espero que de alguma forma um dia, possa servir de inspiração para a tua vida e que te ajude a acreditar que com trabalho e dedicação tudo é possível de alcançar.

Agradecimentos

A realização desta dissertação de mestrado contou com importantes apoios e incentivos sem os quais não se teria tornado uma realidade e aos quais estarei eternamente grata. Ao Engenheiro Alexandre Borga, pela sua orientação, total colaboração no solucionar de dúvidas que foram surgindo ao longo da realização deste trabalho.

À Engenheira Sílvia Amaral um enorme obrigada não só pela sua orientação, mas também pela oportunidade que me concedeu, pela luta constante contra as dificuldades inerentes ao trabalho realizado, pelo incentivo, pela partilha do saber e as valiosas contribuições para o mesmo. Acima de tudo obrigada pela amizade, por estimular o meu interesse pela investigação, bem como pelas boas energias para seguir sempre em frente. Quero agradecer também ao Professor Rui Ferreira pela motivação constante que deu a toda equipa sempre com vontade de mais e melhor.

Os obstáculos associados ao trabalho experimental só foram possíveis de ultrapassar com a cooperação do Departamento de Geotecnia e do Centro de Instrumentação Científica do LNEC, assim como a boa vontade e trabalho de equipa de todos os funcionários da sala de moldagem, construção e experimentadores. Um particular Obrigado aos Srs. Timóteo e Sobreiro Gomes, pela sua ajuda imprescindível na construção das barragens de aterro.

Agradeço ao Nuno que além de colega de equipa se tornou um amigo ao criar um ambiente corporativista, sem dúvida foi imprescindível para o desenvolver deste trabalho. Um obrigada também à Teresa Alvarez e a todos os meus colegas e amigos que me acompanharam estes últimos anos académicos, obrigada pela ajuda, por todos os bons momentos e em particular às amigadas que ficaram mais perto do meu coração, Sara e Inês.

À minha irmã Raquel agradeço por existires, és o que de mais bonito e perfeito existe na minha vida e sem dúvida a minha melhor amiga e conselheira. Ao meu cunhado Pedro que se tornou um irmão para mim, muito obrigada por tudo e à minha Maria pequenina que me inspirou todos os dias com o seu sorriso.

Luís o que posso dizer, completas na perfeição a minha felicidade, sem ti todos os meus sucessos não teriam a mesma emoção e não fariam tanto sentido, obrigada por seres o meu companheiro. Obrigada também à Fátima e ao Sr. Manel pelo carinho que me deram desde o primeiro dia.

Por último, tenho consciência que sem ela nada disto teria sido possível, a minha Mãe, por ser um exemplo de coragem, pelo seu apoio e amor incondicional. Obrigada por estares sempre presente. És sem dúvida uma inspiração para mim e a quem tudo devo.

*Rotura de barragens de aterro por galgamento.
Caracterização laboratorial do hidrograma efluente da rotura.*

Resumo

Das grandes barragens a nível mundial, as barragens de aterro são as mais comuns. No que respeita os fenómenos que desencadeiam a rotura, no caso particular das barragens de aterro, o “galgamento” é a segunda causa mais comum. Os eventos de rotura de barragens representam um elevado risco para as populações e bens localizados nas zonas de inundação. Em particular, a rotura de barragens de aterro pode originar escoamentos geomórficos de elevada magnitude, podendo causar impactos significativos nos vales a jusante.

Têm-se realizado diversos estudos laboratoriais acerca da rotura por galgamento de barragens de aterro que têm produzido informações úteis para a validação de modelos numéricos, mas que falharam na produção de informação fenomenológica detalhada da morfologia da brecha. Desta forma, estas falhas só conseguirão ser reduzidas aprofundando o conhecimento dos mecanismos envolvidos na evolução temporal da brecha, particularmente no que respeita a compreensão dos fenómenos geotécnicos envolvidos e da sua interação com os fenómenos de erosão hidrodinâmica.

Foi neste contexto que surgiu este trabalho final de mestrado tendo como objetivo principal a realização e análise de três ensaios experimentais, em condições hidráulicas e geotécnicas controladas.

Os ensaios experimentais permitiram extrair as seguintes variáveis: i) hidrogramas efluentes da brecha; ii) variação do campo de velocidades do escoamento superficial; iii) avaliação da variação da largura da brecha durante a ocorrência de episódios de erosão geotécnica (queda de grandes massas de solo do corpo da barragem); e iv) morfologia da brecha durante a rotura (com auxílio de um sensor de movimento - *Kinect Sensor*).

As variáveis recolhidas permitiram, para além da caracterização dos hidrogramas efluentes da barragem, compreender a relação entre a hidrodinâmica do escoamento e a morfologia da brecha durante a ocorrência de episódios de erosão geotécnica. Permitiram igualmente, perceber a resposta do hidrograma efluente da brecha à ocorrência destes episódios.

Desta forma esta tese foi uma contribuição para o aumento da capacidade de prever a evolução de uma brecha em barragens de aterro, ou seja, para estimar com mais rigor o hidrograma efluente da brecha.

Palavras-chave: rotura por galgamento; barragem de aterro; morfologia da brecha; campo de velocidades superficial (*PIV* e *PTV*); reconstrução de superfícies 3D (*Kinect Sensor*).

Abstract

Embankment dams are the most common type of dam worldwide and the overtopping is their second cause of failure. In a general way the events of rupture of dams represent one high risk for the populations located in the flooding zones. In particular, the rupture of embankment dams can originate geomorphic drainings of high magnitude, being able to cause significant impacts in the downstream valleys.

Until now, many laboratory studies have been developed about the overtopping, the same have brought useful information for the validation of numerical models, which failed on the production of detailed phenomenological information about the breach morphology, therefore, this uncertainty can only be reduced deepening the knowledge of the mechanisms involved in the temporal evolution of the breach, particularly concerning the understanding of the geotechnical phenomena and the interaction with the hydrodynamic erosion.

It was in this context that this master thesis emerged having as main purpose the realization and analysis of three experimental tests under controlled hydraulic and geotechnical conditions.

With the realization of these experimental tests it was possible to extract data on the following variables: i) breach effluent hydrograph; ii) variation of the velocities field of the surface run; iii) evaluation of the variation of the width of the breach in the occurrence of geotechnical and iv) morphology of the breach during the rupture (with the aid of a motion sensor – *Kinect Sensor*).

The variables collect allowed to beyond the characterization of the effluent hydrograms of the dam, to understand the relationship between flow hydrodynamics and the morphology of the breach during the occurrence of geotechnical erosion episodes. They also allowed to understand the effluent hydrograph response of the breach to the occurrence of these episodes.

In this way, this thesis was a contribution to the increased capacity to predict the evolution of a breach in an embankment dam, that is, to estimate more accurately the effluent hydrograph of the breach. Consequently, the work developed in this thesis is a contribution to reduce the uncertainty associated to the models of flood simulation due to this type of breaks.

Key words: break from overtopping; embankment dams; morphology of the breach; variation in the velocities field of the surface run (*PIV* and *PTV*); reconstruction of 3D surfaces (*Kinect Sensor*).

Índice

AGRADECIMENTOS	IV
RESUMO.....	VI
ABSTRACT	VIII
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivo	3
1.3 Estrutura da Dissertação	3
CAPÍTULO 2 BARRAGENS DE ATERRO	5
2.1 Generalidades	5
2.2 Diretrizes construtivas	6
2.3 Causas de rotura	8
2.3.1 Rotura por Galgamento	10
2.3.2 Rotura por Erosão Interna	11
CAPÍTULO 3 CAUDAL EFLUENTE DA BRECHA DE ROTURA	13
3.1 Enquadramento	13
3.2 Abordagens adotadas na literatura	13
3.3 Caudal efluente da rotura	14
3.4 Estimativas do hidrograma efluente da brecha baseadas nos dados do trabalho experimental.....	16
3.4.1 Balanço de massa na albufeira.....	16
3.4.2 Curva de vazão do descarregador do reservatório de jusante	17
CAPÍTULO 4 INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL E INSTRUMENTAÇÃO	19
4.1 Enquadramento	19
4.2 Descrição da Instalação.....	19
4.2.1 Sistema de alimentação	21
4.2.2 Albufeira e descarregadores laterais	22
4.2.3 Local de implantação das barragens e estruturas de suporte à instrumentação	23

4.2.4	Bacia de recolha de sedimentos	23
4.3	Descrição da instrumentação	24
4.3.1	Medição de níveis de água	24
4.3.2	Medição do caudal de entrada.....	27
4.3.3	Aquisição de imagem	28
4.3.4	Sistemas de aquisição de sinal e seus softwares	36
CAPÍTULO 5 ENSAIOS EXPERIMENTAIS.....		39
5.1	Descrição dos ensaios realizados.....	39
5.2	Análises efetuadas em cada ensaio	41
5.3	Descrição do procedimento experimental	41
5.4	Caracterização Geotécnica dos Ensaios	45
5.4.1	Curva granulométrica e Classificação do Solo.....	45
5.4.2	Condições de compactação.....	47
5.5	Construção do Aterro.....	48
5.5.1	Implementação do teor em água alvo	48
5.5.2	Processo de compactação.....	49
5.5.3	Provetes para controlo da compactação.....	51
5.5.4	Corte final do aterro e elaboração do canal piloto	52
CAPÍTULO 6 TRATAMENTO DE DADOS E RESULTADOS.....		53
6.1	Introdução	53
6.2	Estimativas do hidrograma efluente da brecha	53
6.3	Estudo da hidrodinâmica do escoamento e da morfologia da brecha	58
6.3.1	Particle Image Velocimetry (PIV) e Particle Tracking Velocimetry (PTV) 58	
6.3.2	Modelo conceptual do escoamento sob a brecha	59
6.3.3	Variáveis analisadas.....	60
6.3.4	Ensaio 1	61
6.3.5	Ensaio 2	69
6.4	Evolução Temporal da Brecha de Rotura – Kinect Sensor	78
CAPÍTULO 7 CONCLUSÕES.....		81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		83

Índice de Figuras

Figura 2.1 - a) Barragem de Odelouca (aterro – terra); b) Barragem do Alqueva (betão - abóbada de dupla curvatura).	5
Figura 2.2 - Representação de uma barragem de aterro homogénea.....	6
Figura 2.3 - Representação de uma barragem de aterro zonada.....	6
Figura 2.4 - Exemplo de soluções de drenagem de uma barragem de aterro.....	7
Figura 2.5 - Exemplos de roturas relevantes por galgamento de barragens de aterro. a) Barragem de Banqiao - 1975; b) Barragem II de Machhu - 1979; c) Barragem de Laurel Run - 1977; d) Barragem de Timberlake - 1995.	9
Figura 2.6 - Barragem da mina da Fonte Santa após a rotura por galgamento (Mogadouro - Portugal).....	10
Figura 2.7 - Formação da brecha por galgamento. a) Início no ponto mais fraco; b) Brecha em forma de "V"; c) Aprofundamento da brecha; d) Aumento lateral por erosão.	11
Figura 2.8 - Exemplo de rotura por “erosão interna” - Barragem de <i>Teton</i> , EUA em 1976.	12
Figura 2.9 - Processo de formação de uma brecha por “erosão interna”. a) Iniciação da erosão Interna; b) Continuação da erosão (filtragem); c) Progressão da Erosão; d) Formação de um mecanismo da brecha. Adaptado de (Fry, 2005).....	12
Figura 3.1 - Vista frontal da evolução geométrica idealizada da brecha de rotura de uma barragem de aterro. Adaptado de: Singh (1996).	14
Figura 3.2 - Esquema da aplicação da estimativa indireta do caudal efluente da brecha com base num balanço de massas na albufeira.	17
Figura 3.3 - Esquema da aplicação da estimativa indireta do caudal efluente da brecha com base na curva de vazão do descarregador de cheias do reservatório de jusante.	17
Figura 3.4 - Comportamento do escoamento no interior do reservatório de jusante para os maiores caudais.....	18
Figura 4.1 - Planta da instalação experimental.	20
Figura 4.2 - Sistema de alimentação: a) tanques inferior e superior; b) sistema de bombagem; c) válvula de controlo de caudal; d) conduta de ligação entre os tanques; e) descarregador de jusante e caleira de jusante; f) tubagem de entrada e sistema de tranquilização do caudal.	21
Figura 4.3 – a) Vista geral da albufeira; b) Vista a montante da barragem.	22
Figura 4.4 - Vista geral da albufeira vazia. Localização dos descarregadores laterais.	22
Figura 4.5 - Local de implementação da barragem.	23
Figura 4.6 - a) Reservatório de Jusante; b) Descarregador a jusante do aterro.	24
Figura 4.7 - Sondas acústicas modelo UNQ30U6103/S14 e Planta do posicionamento das sete sondas utilizadas durante os ensaios experimentais a montante do aterro... 25	

Figura 4.8 - Ilustração do processo de calibração das sondas acústicas. a) limite de escala inferior – 10 cm (0 V); b) limite de escala superior – 60 cm (10 v).....	26
Figura 4.9 - Sondas de nível resistivas desenhadas e produzidas no Centro de Instrumentação científica do LNEC; a) Sonda resistiva no reservatório de montante; b) Sonda resistiva colocada no reservatório de jusante.	27
Figura 4.10 - Caudalímetro existente na instalação experimental.	28
Figura 4.11 - Câmaras de alta velocidade monocromáticas; a) Mikrottron - EoSens® 3CL High-Speed CMOS colocada verticalmente sob a barragem a uma distância de cerca de 2,70m do coroamento; b) Photonfocus MV-D1024E-160-CL-12 colocada na diagonal em relação ao paramento de montante da barragem.	29
Figura 4.12 - Posicionamento das câmaras de alta velocidade na instalação experimental.	29
Figura 4.13 - Exemplo de imagem captada pela câmara de alta velocidade <i>Photonfocus</i> ; b) Exemplo de imagem captada pela câmara de alta velocidade <i>Mikroton</i>	30
Figura 4.14 – a) Câmara digital utilizada para monitorização do paramento de jusante (<i>CANON</i>); b) Câmara digital para monitorização em planta do ensaio (<i>SONY</i>).	31
Figura 4.15 - Características do <i>Kinect Sensor</i>	31
Figura 4.16 - a) Posicionamento do <i>Kinect Sensor</i> no ensaio experimental; b) pormenor do <i>Kinect Sensor</i> ; c) Exemplo de um dos três alvos de referência utilizados na execução do ensaio.	32
Figura 4.17 - Dispensadores de partículas de poliestireno utilizados durante os ensaios experimentais.	34
Figura 4.18 - Ilustração da queda de partículas de esferovite.	34
Figura 4.19 - Laser. a) Esquema de montagem; b) pormenor da lente cilíndrica.	35
Figura 4.20 - Posicionamento dos holofotes em relação às barragens. Pormenor do holofote.	36
Figura 4.21 - a) <i>Hardware Spider 8</i> ; b) Receção de sinal das sondas.	37
Figura 4.22 - Software CatmanEasy conectado com as seis sondas resistivas e com o caudalímetro.	37
Figura 4.23 – Esquerda: Placa de aquisição de sinal das sondas acústicas (DAQ - NI 9203 - IST); Direita: chassis de alimentação da placa (NI cDAQ - 9172 - CIC).	38
Figura 5.1 - Vista frontal das barragens construídas e canal piloto. Ensaio 1 e Ensaio 3 (<i>Kinect Sensor</i>) - geometria triangular. Ensaio 2 - geometria retangular;	40
Figura 5.2 - Canais piloto dos ensaios realizados a) Ensaio 2 - geometria retangular; b) Ensaio 1 e 3 (<i>Kinect Sensor</i>) – geometria triangular.	40
Figura 5.3 - Compactador PC1010 da <i>Euro Shatal</i> utilizado na compactação do aterro.	49
Figura 5.4 - a) Processo de compactação da 3. ^a camada da barragem; b) Morfologia do aterro após a compactação da 4. ^a camada.	50
Figura 5.5 - Esquema final do aterro após o processo de compactação.	50

Figura 6.1 - Aplicação do <i>PTV</i> a duas imagens sequenciais ($dt=1/150s$) adquiridas com a câmara de alta velocidade Mikrotron: a) Partículas selecionadas; b) instante da posição inicial e final das partículas.	59
Figura 6.2 – Zonas do escoamento sob a brecha. Exemplo da ocorrência de um episódio de rotura geotécnica.	59
Figura 6.3 - Representação do modelo conceptual que traduz a hidrodinâmica do escoamento junto à brecha.	60
Figura 6.4 - Representação do lado esquerdo e direito de convenção para a análise do escoamento não separado.	61
Figura 6.5 - a) Delimitação da área do bloco de solo que cai ao segundo 7928,3s.	62
Figura 6.6 - Exemplo da representação da área de interrogação - Secção A para melhor análise das velocidades.	63
Figura 6.7 - a) instante $t=7928,1$ antes da queda do bloco de aterro; b) instante da queda $t=7928,3$; c) morfologia final da brecha do aterro após o episódio de erosão geotécnica no instante $t=7928,6s$	64
Figura 6.8 - a) instante $t=8040,8s$ antes da queda do bloco de aterro; b) instante da queda $t=8041,2s$; c) morfologia final da brecha do aterro após o episódio de erosão geotécnica no instante $t=8041,3s$	67
Figura 6.9 - Delimitação da área do bloco de solo que cai ao segundo 2883,6s.	69
Figura 6.10 - a) instante $t=2882,9$ antes da queda do bloco de aterro; b) instante da queda $t=2883,3$; c) morfologia final da brecha do aterro após o episódio de erosão geotécnica no instante $t=2883,6s$	71
Figura 6.11- Delimitação da área do bloco de solo que cai ao segundo 2796,6s.	73
Figura 6.12 - Representação dos instantes do episódio de erosão geotécnica do intervalo [2795-2799] s do Ensaio 2.	75
Figura 6.13 - Evolução Morfológica da brecha de rotura: a) Vista frontal antes do início do ensaio experimental; b) vista frontal após o último episódio de erosão geotécnica; c) Corte do aterro antes da rotura; d) Corte do aterro após o último episódio de rotura; e) Perspetiva antes do ensaio de rotura; f) Perspectiva final da barragem de aterro – fim do ensaio.	79
Figura 6.14 – Planta da Evolução da Brecha de rotura. a) Morfologia idealizada; b) Morfologia medida com o Kinect Sensor, c) Dados do Kinect na forma de mapas de contornos.	80

*Rotura de barragens de aterro por galgamento.
Caracterização laboratorial do hidrograma efluente da rotura.*

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Exemplos de barragens de aterro portuguesas - homogénea e zonada. <i>fonte: Agência Portuguesa do Ambiente.</i>	7
Tabela 3.1 - Processo do avanço da brecha numa barragem de aterro - vista lateral. Powledge (1989).....	15
Tabela 3.2 - Estimativas do caudal efluente da brecha.....	16
Tabela 5.1 - Principais características geotécnicas dos ensaios realizados.....	39
Tabela 5.2 - Conjunto de atividades a realizar uma semana antes da concretização do ensaio experimental.....	42
Tabela 5.3 - Conjunto de atividades necessárias na véspera à realização do ensaio experimental.....	43
Tabela 5.4 - Conjunto de atividades necessárias no dia do ensaio.....	44
Tabela 5.5 - Peneiração do solo utilizado.....	46
Tabela 5.6 - Descrição do processo de substituição de areia. Adaptado de (Leonardo,2016).	51
Tabela 6.1 - Resultados da análise da distância entre o limite lateral esquerdo e direito após o episódio de erosão geotécnica para o intervalo [7928,1s-7928,6s].	64
Tabela 6.2 - Resultados da análise da distância entre o limite lateral esquerdo e direito após o episódio de erosão geotécnica para o intervalo [8040,8s-8041,3s].	67
Tabela 6.3 - Resultados da análise da distância entre o limite lateral esquerdo e direito após o episódio de erosão geotécnica. Resultados da análise da distância entre o limite lateral esquerdo e direito após o episódio de erosão geotécnica. Intervalo [2881.7-2884] s.....	70
Tabela 6.4 - Resultados da análise da distância entre o limite lateral esquerdo e direito após o episódio de erosão geotécnica. Intervalo [2795-2799] s.....	74

Índice de Gráficos

Gráfico 5.1 - Representação da Curva Granulométrica (Santos, 2016).....	46
Gráfico 5.2 - Curva de Compactação - Ensaio Proctor (Santos, 2016).	47
Gráfico 5.3 - Curva de Compactação - 25% do Ensaio Proctor (Santos, 2016).....	48
Gráfico 6.1 - Hidrograma Efluente da brecha - Ensaio 1	54
Gráfico 6.2 - Hidrograma Efluente da brecha - Ensaio 1 para o intervalo [7650 – 8150] s com as respectivas representações da brecha após os episódios de erosão geotécnica.	55
Gráfico 6.3 - Hidrograma Efluente da brecha - Ensaio 2	56
Gráfico 6.4 - Hidrograma Efluente da brecha - Ensaio 2 para o intervalo [2750 – 2950] s com as respectivas representações da brecha após os episódios de erosão geotécnica.	57
Gráfico 6.5 - Variação da velocidade em Pix/s das partículas de poliestireno durante o intervalo definido. Ponto 1 – Instante onde se processa a queda do bloco do aterro (t=7928,3s).	63
Gráfico 6.6 - Representação gráfica da variação dos limites esquerdo/direito e da largura do escoamento não separado no intervalo [7926,6- 7933,1] segundos. Ponto 1 – Instante do episódio de erosão geotécnica.	65
Gráfico 6.7 - Variação da velocidade em Pix/s das partículas de poliestireno durante o intervalo definido. Ponto 1 – Instante onde se processa a queda do bloco do aterro (t=8041,22s).	66
Gráfico 6.8 - Representação gráfica da variação dos limites esquerdo/direito e da largura do escoamento não separado no intervalo [8039,1- 8045,8] segundos. Ponto 1 – Instante do episódio de erosão geotécnica.	68
Gráfico 6.9 - Variação da velocidade em Pix/s das partículas de poliestireno durante o intervalo definido. Ponto 1 - Instante onde se processa a queda do bloco de aterro (t=2883,36s).	70
Gráfico 6.10 - Representação gráfica da variação dos limites esquerdo/direito e da largura do escoamento não separado no intervalo [2882,1- 2885,1] segundos. Ponto 1 – Instante do episódio de erosão geotécnica.	72
Gráfico 6.11 - Variação da velocidade em Pix/s das partículas na direção X e direção Y na área de interrogação definida. Ponto 1 - Instante onde se processa a queda do bloco de terra t=2796,6s.....	74
Gráfico 6.12 - Representação gráfica da variação dos limites esquerdo/direito e da largura do escoamento não separado no intervalo [2795,8- 2799,6] segundos. Ponto 1 – Instante do episódio de erosão geotécnica.	76
Gráfico 6.13 - Variação a longo prazo da largura do escoamento não separado e dos limites esquerdo e direito para o intervalo em estudo [2795-2799] s bem como do caudal efluente e afluente do Ensaio 2.....	77

Simbologia

PTV Particle Tracking Velocity

PIV Particle Image Velocity

LPSPIV Large Scale Particle Image Velocity

ICOLD Internacional Commission on Large Dams

LNEC Laboratório Nacional de Engenharia Civil

ES Escoamento Separado

ENS Escoamento não Separado

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

A rotura de uma barragem representa um elevado risco para as populações e bens localizados nas zonas inundadas dos vales a jusante (Wahl 2004; Yochum et al. 2008). As barragens de aterro totalizam aproximadamente 3/4 das 33105 grandes barragens a nível mundial, das quais 88% correspondem a barragens de terra e 12% a barragens de enrocamento (ICOLD, 2003).

No que respeita os fenómenos que desencadeiam a rotura, no caso particular das barragens de aterro, a “erosão interna” aparece como a principal causa deste tipo de acidentes (46%), sendo que o “galgamento” aparece logo a seguir (36%), considerando uma base de dados das roturas registadas entre 1940 e 2000 (Foster *et al.* 2000).

A rotura por galgamento de barragens de aterro, origina o aparecimento de uma brecha, levando a que a água armazenada na albufeira seja libertada para jusante, duma forma potencialmente abrupta, podendo originar um escoamento geomórfico com elevado potencial destrutivo. O caudal escoado para jusante, é dependente das características do material da barragem, da dimensão da albufeira, e das interações entre os fenómenos de origem hidráulica e geotécnica da rotura (Singh, 1996). No fundo, estas são as variáveis das quais depende também a evolução temporal da brecha, de modo que, uma rigorosa aferição do caudal escoado para jusante (neste trabalho denominado de “hidrograma efluente da brecha”) está intrinsecamente relacionada com uma correta definição da evolução temporal da brecha. De facto, uma modelação adequada da brecha traduz-se pela caracterização da sua morfologia e da respetiva interação com a hidrodinâmica do escoamento, considerando que, na secção da brecha, o escoamento é complexo e tridimensional.

A maioria dos estudos laboratoriais de rotura por galgamento de barragens e diques de aterro têm sido essencialmente de índole hidráulica, na medida em que, a investigação geotécnica se tem debruçado mais sobre estudos acerca do controlo da percolação.

Sobretudo nos últimos 15 anos, existem vários estudos laboratoriais acerca da rotura por galgamento de diques e barragens de aterro (Vaskinn *et al.* 2004, Zhu 2011, Tingsanchali *and* Chinnarasri, 2001). De uma maneira geral, estes estudos produziram informações úteis, nomeadamente hidrogramas de rotura para validação de modelos numéricos, mas falharam na produção de informação fenomenológica detalhada do processo de rotura, especialmente, no que respeita a descrição dos episódios de rotura geotécnica durante a evolução da brecha e na interação entre a erosão hidrodinâmica e a rotura geotécnica (Wahl, 2004).

De facto, muitos dos estudos laboratoriais realizados, inclusive os mais recentes, apresentam várias fragilidades, como sejam:

- foram realizados assumindo condições de simetria da evolução da rotura - normalmente realizados junto a uma parede acrílica, iniciando a brecha junto à parede, portanto ensaiando apenas metade da barragem assumindo que a outra metade se comporta da mesma forma (Jack 1996, Coleman *et al.*, 2002, Zhao, *et al.*, 2015, Yang *et al.*, 2015);
- utilizaram areias ou materiais com reduzida coesividade na composição dos aterros (aterros não coesivos) e galgaram o aterro como um todo, ou seja, sem canal piloto, o que do ponto de vista do estudo detalhado da evolução da brecha não é uma metodologia apropriada (Shmocker, L. & Hager, W.H., 2009 e 2012);
- utilizaram areias de granulometria uniforme ou misturas de areia, silte e argila não coesivas (Orendorff *et al.*, 2013);
- foram ensaios de pequena escala efetuados com misturas sem coesão aparente e com compactação heterógena (Cestero, 2014).

A maior fonte de incerteza e limitação das ferramentas de previsão dos impactos da inundação em leitos de cheia decorrentes da rotura de barragens é a previsão adequada dos hidrogramas efluentes. Para diminuir esta incerteza e conseguir caracterizar de forma rigorosa estes hidrogramas é necessário melhorar a capacidade atual de prever de forma fiável a formação e evolução de brechas em aterros de terra devido ao galgamento. Este melhoramento só poderá ser conseguido através de uma análise de pormenor dos dados resultantes de ensaios experimentais rigorosamente instrumentados com tecnologia recente e métodos de medição inovadores.

1.2 Objetivo

Este trabalho, genericamente de índole experimental, debruça-se sobre o tema da rotura por galgamento de barragens de aterro, e tem como objetivos estruturais: i) caracterizar o mecanismo de rotura, nomeadamente compreender os fenómenos hidrodinâmicos e geotécnicos da evolução de uma brecha no corpo da barragem; e ii) calcular o hidrograma efluente da brecha.

Para atingir estes objetivos identificam-se os seguintes objetivos operacionais:

- realizar três ensaios experimentais de rotura por galgamento de barragens de aterro homogéneas com coesão aparente, em condições adequadas de controlo hidráulico e geotécnico;
- utilizar instrumentação recente e métodos de medição inovadores para aquisição das variáveis que caracterizam a evolução da brecha e o caudal proveniente da rotura;
- calcular o hidrograma efluente da brecha em rotura;
- levar a cabo trabalho específico de identificação e categorização dos fenómenos hidrodinâmicos e de mecânica do transporte sólido envolvidos na rotura gradual, por galgamento, de barragens de aterro homogéneas, nomeadamente, compreender a relação entre a hidrodinâmica do escoamento junto à brecha e os “episódios de erosão geotécnica” (designação utilizada ao longo de todo o texto para referir a queda súbita de massas de solo para o escoamento).

1.3 Estrutura da Dissertação

A presente tese está dividida em sete capítulos. O presente capítulo expõe, de uma forma introdutória a motivação para a elaboração da mesma e quais os objetivos pretendidos a alcançar com o trabalho a ser desenvolvido.

O Capítulo 2, “Barragens de Aterro”, é uma das frações mais importantes de todo o trabalho científico, uma vez que faz referência às generalidades do tema em questão. Assim este capítulo descreve os diferentes tipos de barragens, especificando-se nas barragens de aterro e suas diretrizes construtivas e ainda quais os mecanismos de rotura que as mesmas estão sujeitas, acentuando-se na rotura por galgamento e rotura por erosão interna.

O Capítulo 3, “Caudal Efluente da brecha de rotura” faz um enquadramento às várias abordagens adotadas na literatura para a determinação do caudal efluente da rotura, bem como, às estimativas do hidrograma efluente da brecha.

O Capítulo 4, “Instalação Experimental e Instrumentação”, torna-se bastante relevante pelo carácter experimental da dissertação. Neste capítulo descrevem-se as características da instalação, quais as ferramentas para a aquisição de dados, mais especificamente, os equipamentos e respetivos sistemas informáticos e físicos que completam os ensaios.

O Capítulo 5, “Ensaio Experimentais” descreve todo o processo da elaboração de um ensaio experimental, particularizando as atividades que se executam quer na véspera do ensaio, durante e após o mesmo. Ainda neste capítulo faz-se a caracterização geotécnica dos ensaios, que engloba uma caracterização dos solos e a construção física do aterro.

Para o Capítulo 6, “Tratamento de Dados e Resultados” apresenta-se um conjunto de resultados consequentes do tratamento e análise de dados adquiridos após a elaboração dos ensaios experimentais.

Por fim, o Capítulo 7, “Conclusões” são descritas as principais conclusões retiradas da elaboração desta dissertação, assim como, os trabalhos futuros que se poderão vir a desenvolver.

Capítulo 2

Barragens de aterro

2.1 Generalidades

Sabendo que a água é um recurso natural cuja abundância ou carência tem repercussões profundas na evolução das populações humanas, a construção de barragens para armazenamento de água entre estações tem sofrido fortes desenvolvimentos, sobretudo desde o início do século XIX. Para além desta finalidade, as barragens servem também para o controlo de cheias, para alimentar redes de irrigação e para produção de energia elétrica. São, portanto, elementos estruturais para o desenvolvimento económico da sociedade.

Existem diversos critérios para a classificação de barragens, dos quais fazem parte os materiais que as constituem, a sua dimensão, a respetiva finalidade principal e os tipos de estrutura que possam apresentar.

Relativamente aos materiais que compõem a barragem, estas podem classificar-se em: i) barragens de betão (abóbada; contrafortes; gravidade); e ainda em ii) barragens de aterro (terra; enrocamento; podendo ainda ser homogéneas ou zonadas) - Figura 2.1.

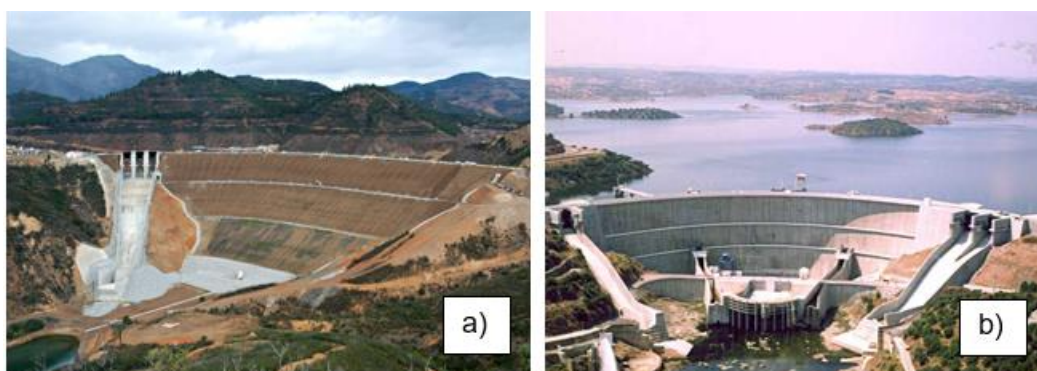


Figura 2.1 - a) Barragem de Odelouca (aterro – terra); b) Barragem do Alqueva (betão - abóbada de dupla curvatura).

Relativamente à dimensão das barragens, as mesmas podem classificar-se como grandes ou pequenas, estando esta classificação dependente geralmente da altura e do volume de armazenamento na albufeira.

Relativamente à principal finalidade das barragens, estas classificam-se em barragens para abastecimento, irrigação, produção hidroelétrica, regulação de cheias, armazenamento de rejeitados, regulação de cheias ou fins múltiplos.

2.2 Diretrizes construtivas

As barragens de aterro são o tipo mais comum de barragem, o que se deve a vários aspetos: i) apresentam poucas exigências ao nível das fundações (moldam-se com facilidade a vários tipos de fundações); ii) são compostas por materiais em estado natural e aceitam uma diversidade extensa de solos; iii) são, normalmente, soluções menos dispendiosas.

As barragens de aterro podem ser classificadas como:

- i. **barragens homogéneas** (Figura 2.2) – compostas apenas por um único tipo de solo, com adequada resistência e capacidade de impermeabilização que possam permitir valores aceitáveis de percolação;
- ii. **barragens zonadas** (Figura 2.3) – compostas por um núcleo argiloso e maciços de outro tipo de solo, compatíveis com condições de resistência e impermeabilização adequadas.

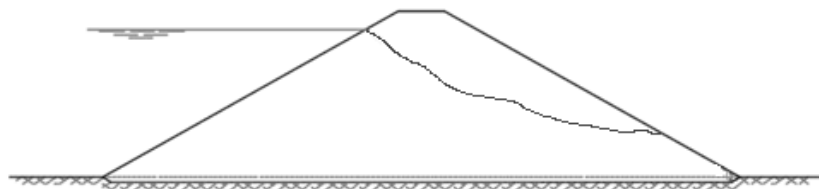


Figura 2.2 - Representação de uma barragem de aterro homogénea.

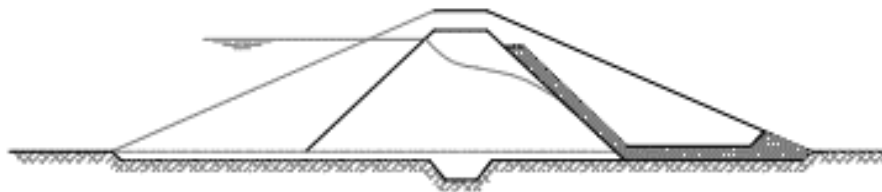




Figura 2.3 - Representação de uma barragem de aterro zonada

Na Tabela 2.1 apresentam-se duas barragens de aterro portuguesas, homogénea e zonada.

Tabela 2.1 - Exemplos de barragens de aterro portuguesas - homogénea e zonada.
fonte: Agência Portuguesa do Ambiente.

<p>barragem homogénea</p>	<p>Essencialmente constituída por materiais finos, sendo a percolação e a erosão difíceis de controlar.</p>	 <p>Barragem de Vale Madeiro Bragança</p>
<p>barragem zonada</p>	<p>Com materiais diferentes ou com compactações diferentes, o controlo da percolação é feito pelo material que é colocado no núcleo.</p>	 <p>Barragem do Sabugal</p>

As inclinações dos paramentos de montante e jusante são dependentes da composição do solo adotado, assim como, das condições de compactação e teor em água.

No que respeita, as condições de compactação das barragens de aterro, as mesmas devem ser compactadas para evitar assentamentos e que ocorram ressurgências no talude de jusante da barragem, assim como se deve garantir uma ligação adequada entre camadas. Note-se que, na presença de ressurgências, as forças de percolação originadas poderão iniciar um processo de rotura por erosão interna. Portanto, é fundamental o controlo da percolação no interior da barragem, servindo os sistemas de drenagem interna das barragens de aterro precisamente para este fim (drenagem vertical e horizontal, como exemplo os drenos verticais (dreno de chaminé) ou inclinados, tapetes drenantes e drenos de pé de talude - Figura 2.4).

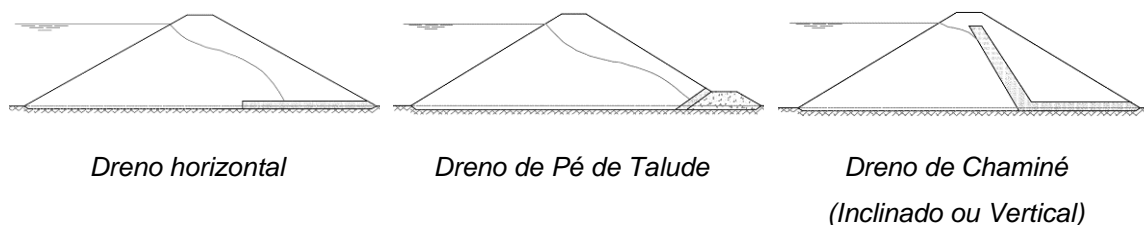


Figura 2.4 - Exemplo de soluções de drenagem de uma barragem de aterro.

Lança & Costa (2001) assinalam a importância da existência de filtros para efetuarem a transição entre o material impermeável do núcleo e o talude de jusante (com maior permeabilidade), para evitar arrastamento de finos e um conseqüente início de um processo de erosão interna.

As barragens homogéneas são a primeira solução considerada no caso de se decidir implementar uma barragem de aterro. A implementação de uma barragem zonada relaciona-se normalmente com o facto do solo existente no local de construção da barragem não ser adequado ou ser insuficiente. Uma vez que as barragens zonadas são compostas por um núcleo argiloso, que já garante condições de “estanquidade” adequadas (reduzido coeficiente de permeabilidade), o material a adotar nos maciços laterais já pode ser de menor qualidade (pode ser um solo mais permeável, ou também pode ser enrocamento).

2.3 Causas de rotura

As barragens de betão apresentam, normalmente, roturas muito céleres (*quasi-instantâneas*), uma vez que, a sua rotura é normalmente representada pela destruição parcial ou mesmo total da estrutura da barragem. Roturas “instantâneas” correspondem então a uma súbita libertação da massa de água contida na albufeira, gerando uma onda de inundação que se propaga ao longo do vale a jusante da barragem, formando-se em simultâneo na secção de rotura da barragem, uma onda negativa que se desloca para montante ao longo do reservatório. Por sua vez, as barragens de aterro rompem, normalmente, de forma gradual, embora, em algumas situações específicas (como o deslizamento de uma massa de solo ao longo de uma superfície preferencial de escoamento que se forme no interior da barragem) possam romper de forma mais acelerada.

De acordo com Singh (1996) as principais causas de rotura de barragens de aterro são o galgamento, a erosão interna, a ação de ondas na albufeira, o escorregamento da fundação, e a erosão da fundação a jusante da barragem. No entanto são várias as causas que podem originar a rotura de barragens de aterro: i) dimensionamento inadequado da barragem ou dos próprios órgãos de segurança e exploração; ii) construção imprópria (inadequação do solo; desvios de compactação em relação aos valores de referência - *Proctor Standard*); iii) falta de manutenção e/ou inspeção; iv) destruição humana ou animal; v) falhas nas fundações; vi) deslizamentos de terra provocados por situações geofísicas extremas; vii) ocorrência de cheias

superiores aos caudais de dimensionamento dos órgãos de descarga; viii) ação de ondas na albufeira; ix) outras condições adversas.

Neste contexto, a rotura de uma barragem de terra é uma ocorrência dependente de uma série de variáveis, de maneira que, não se conseguem prever e/ou evitar todas as situações adversas.

Atualmente as causas mais comuns de rotura de barragens de aterro são a “erosão interna” e o galgamento (Clague & Evans, 2000), atribuindo-se percentagens de 46 e 36%, respetivamente, de acordo com Foster *et al.* (2000) que considerou uma base de dados das roturas registadas entre 1940 e 2000.

Seguidamente apresentam-se vários exemplos de importantes roturas por galgamento de barragens de aterro que causaram danos extensivos, incluindo um elevado número de fatalidades (Figura 2.5):

- i) Barragem de South Fork (EUA, 1889);
- ii) Barragem de Liujaitai (China, 1963);
- iii) Barragem de Canyon Lake (EUA, 1972);
- iv) Barragem de Lijaizui (China, 1972);
- v) Barragens de Banqiao e Shimantan (China, 1975);
- vi) Barragem II de Machhu (Índia, 1979);
- vii) Barragem de Laurel Run (EUA, 1977);
- viii) Barragem de Timberlake (EUA, 1995);
- ix) Barragem de Ka Loko (Havaí, 2006);

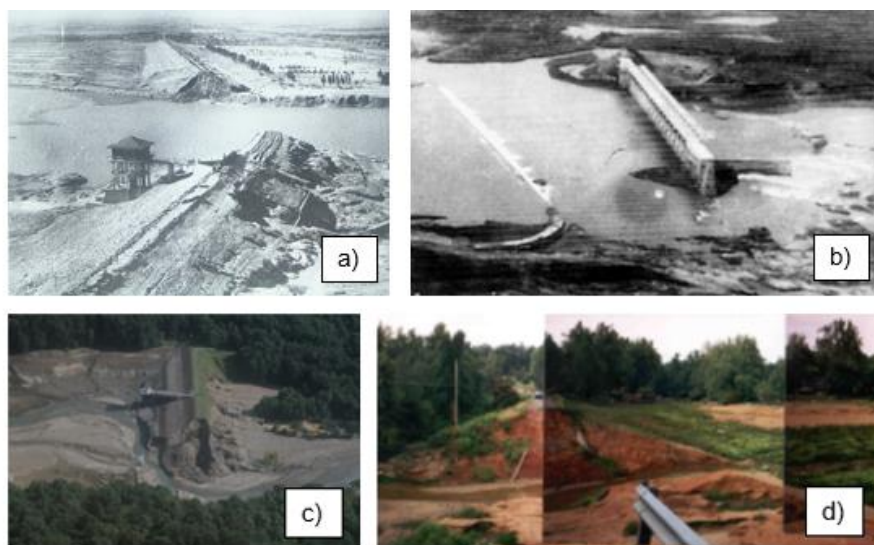


Figura 2.5 - Exemplos de roturas relevantes por galgamento de barragens de aterro.
a) Barragem de Banqiao - 1975; b) Barragem II de Machhu - 1979; c) Barragem de Laurel Run - 1977; d) Barragem de Timberlake - 1995.

A rotura de barragens de aterro pode igualmente originar impactos ambientais adversos nos vales a jusante. Tome-se como exemplo, a rotura da barragem da Mina da Fonte Santa (barragem de rejeitados), localizada na ribeira da Fonte Santa, afluente do Rio Sabor, ocorrida a 27 de novembro de 2006, devido à combinação da ocorrência de uma precipitação excecional com uma obstrução parcial do descarregador de cheias principal - Figura 2.6.

As lamas contaminadas pela lavagem dos rejeitados das minas depositaram-se ao longo de vários quilómetros a jusante da barragem.



Figura 2.6 - Barragem da mina da Fonte Santa após a rotura por galgamento (Mogadouro - Portugal).

2.3.1 Rotura por Galgamento

O fenómeno de galgamento corresponde à passagem de água sobre o corpo de uma barragem. O galgamento é frequentemente originado pela ocorrência de um evento hidrológico extremo (com período de retorno superiores ao considerado no dimensionamento dos órgãos de descarga) e que, por isso, leva a que o volume de água não descarregado, exceda o volume disponível na albufeira e, conseqüentemente, galgue a estrutura da barragem.

Inicialmente, o galgamento traduz-se por um processo de erosão superficial do paramento de jusante, desenvolvendo-se posteriormente para uma erosão em profundidade do corpo da barragem. Inclusivamente, a erosão regressiva do paramento de jusante da barragem leva ao aparecimento de cavidades de erosão, que estão na origem do destacamento de grandes massas de solo por instabilização geotécnica.

A evolução morfológica da brecha formada pela rotura é dependente de vários fatores, internos e externos. Entre os primeiros, refiram-se a duração do galgamento, o tipo de barragem, as propriedades geotécnicas do solo utilizado, o grau de compactação do

aterro, assim como a própria geometria do aterro. Os fatores externos são a própria característica do evento hidrológico que deu origem ao galgamento, assim como da própria geometria e capacidade de armazenamento da albufeira.

Segundo Singh (1996) após a formação da brecha, a mesma desenvolve-se por ação do escoamento superficial, erodindo o material do talude e transportando-o para jusante, mantendo aproximadamente uma geometria em "V". Enquanto o escoamento se processa a brecha vai aumentando gradualmente e adquirindo outro formato. Por fim, o alargamento da brecha é condicionado pela capacidade de transporte do caudal, pelo que, capacidades reduzidas traduzem-se em brechas mais estreitas, enquanto capacidades de transporte superiores se revertem em brechas mais abertas. Na Figura 2.7 ilustram-se vários estágios de desenvolvimento da brecha.

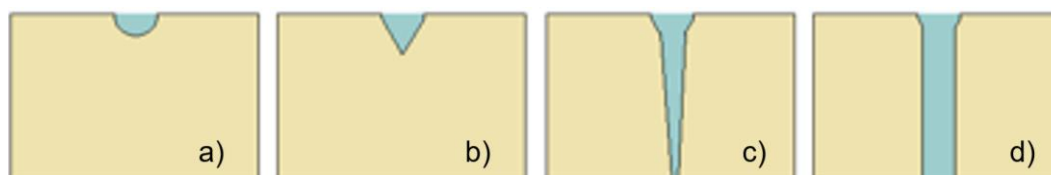


Figura 2.7 - Formação da brecha por galgamento. a) Início no ponto mais fraco; b) Brecha em forma de "V"; c) Aprofundamento da brecha; d) Aumento lateral por erosão.

2.3.2 Rotura por Erosão Interna

A rotura por erosão interna corresponde ao arrastamento de partículas de solo através de percolação do interior do corpo da barragem ou da sua fundação. Mencione-se que, após o primeiro enchimento de uma barragem de aterro, é suposto que se estabeleça uma linha de percolação interna no corpo da barragem, denominando-se esse estado como *percolação em regime permanente*. Apenas no caso em que o fluxo através da barragem é elevado e, por isso, a velocidade de arrastamento é superior ao valor crítico para iniciar o movimento incipiente das partículas de menor diâmetro é que se pode dar origem a um processo de rotura por erosão interna. Portanto, a erosão interna caracteriza-se pela formação de um canal preferencial de escoamento no interior da barragem, no qual se origina o transporte sólido por arrastamento através do maciço, sendo que o grau de erosão é proporcional à capacidade do canal permanecer aberto.

Segundo Foster *et al.* (2000) a probabilidade de rotura por erosão interna é fortemente dependente do tipo de conceção adotado e da idade da barragem. A rotura por "erosão interna" através do aterro ou da fundação estão mais frequentemente associadas a barragens zonadas, que apresentam um menor controlo da percolação no aterro e/ou na fundação. No caso das barragens de aterro com enrocamento no paramento de jusante,

a incidência de rotura por erosão interna é muito reduzida uma vez que, mesmo quando se dá início a um processo de erosão interna no corpo da barragem, a probabilidade de progressão para formação de uma brecha é bastante reduzida.

O início de um processo de erosão interna com potencial para romper a barragem é muitas vezes devido à ausência e/ou dimensionamento indevido dos filtros que deverão localizar-se entre os materiais com diferentes permeabilidades para controlo da erosão (por retenção das partículas finas arrastadas e por redução de fugas concentradas de caudal). Deste modo, as barragens que combinem um fraco controlo da compactação durante a fase de construção e não tenham implementado um sistema de drenagem interna da barragem, têm uma maior probabilidade de sofrer incidentes por “erosão interna” através do corpo da barragem.

Como exemplo de uma rotura por erosão interna em que a mesma ocorreu após o primeiro enchimento provocado pelo desequilíbrio de pressões intersticiais refira-se a barragem de *Teton*, no Idaho, Estados Unidos em junho de 1976. A brecha formada nesta rotura apresentou dimensões finais de 190x79 m (largura x altura) - Figura 2.8.



Figura 2.8 - Exemplo de rotura por “erosão interna” - Barragem de *Teton*, EUA em 1976.

O processo de erosão interna de uma barragem de aterro pode ser dividido em quatro fases distintas, representadas na Figura 2.9.

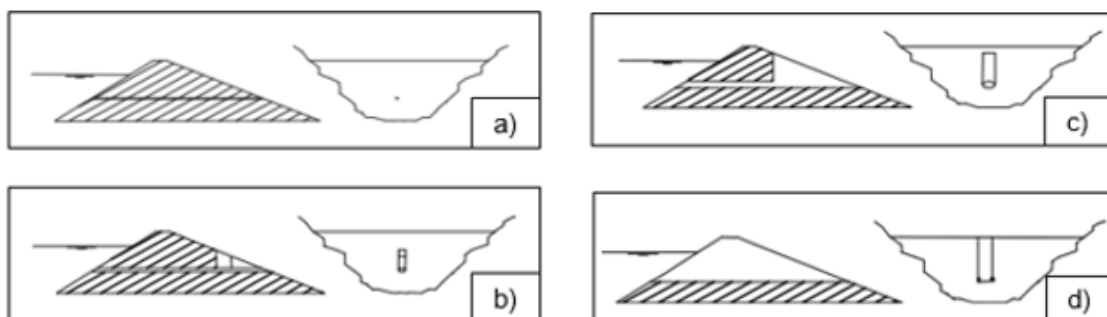


Figura 2.9 - Processo de formação de uma brecha por “erosão interna”. a) Iniciação da erosão Interna; b) Continuação da erosão (filtragem); c) Progressão da Erosão; d) Formação de um mecanismo da brecha. Adaptado de (Fry, 2005).

Capítulo 3

Caudal efluente da brecha de rotura

3.1 Enquadramento

Neste capítulo apresentam-se sucintamente as várias abordagens adotadas na literatura, para determinação do caudal efluente de uma barragem de aterro em rotura.

Ficará claro que os modelos de simulação numérica de roturas que parametrizam o caudal efluente da brecha através de uma lei deste tipo (*lei de descarregador*: $Q \sim H^{3/2}$), consideram que a variação do caudal é linear e, como tal, aumentos da área da brecha (da largura (b) ou da carga hidráulica (H)) repercutem-se em aumentos do caudal efluente. Neste contexto, um dos objetivos deste trabalho foi compreender como é que varia esta área quando ocorrem episódios de erosão geotécnica junto à área da brecha, isto é, o destacamento de grandes massas de solo da secção da brecha.

O outro objetivo deste trabalho foi a determinação do caudal efluente da brecha das barragens de aterro ensaiadas. Este caudal foi determinado com base em duas estimativas distintas cujas metodologias se explicitam no ponto 3.4.

3.2 Abordagens adotadas na literatura

Segundo Wahl (1998) existem várias abordagens adotadas na determinação do caudal efluente de uma barragem de aterro em rotura, nomeadamente: i) equações empíricas de previsão, ii) modelos paramétricos; iii) modelação física.

Os modelos que se baseiam em equações empíricas de previsão empregam expressões que relacionam o caudal máximo efluente da brecha com as características da barragem ou da albufeira, tais como, a altura, o volume armazenado ou mesmo uma variável que dependa destas duas últimas características. É de salientar que estas expressões são desenvolvidas essencialmente com base em roturas históricas, que apenas conseguem determinar o caudal máximo efluente, mas não a geometria ou evolução da brecha formada, e conseqüentemente, também não conseguem caracterizar os hidrogramas efluentes.

Os modelos paramétricos permitem definir a geometria da brecha, bem como o tempo de rotura recorrendo a dados estatísticos obtidos a partir de roturas históricas (protótipos) ou

a resultados experimentais baseados em modelos físicos. Estes permitem determinar a evolução temporal da brecha e o respetivo hidrograma efluente.

Os modelos baseados em resultados adquiridos em modelação física permitem obter estimativas da evolução temporal da brecha e do respetivo hidrograma efluente utilizando modelos de erosão baseados em princípios de hidráulica, de transporte sólido e de mecânica de solos. Ou seja, estes modelos são desenvolvidos relacionando as equações de regime variável com equações de erosão e de transporte sólido.

3.3 Caudal efluente da rotura

Segundo Singh (1996) nas roturas por galgamento de aterros, o caudal efluente da brecha (assumida como evoluindo em forma trapezoidal) - Figura 3.1 obedece a uma lei de vazão do tipo descarregador de soleira espessa (Equação 3.1)

$$Q = Cb\sqrt{g}\left(\frac{2}{3}H\right)^{\frac{3}{2}} \quad (3.1)$$

onde: Q - caudal efluente da brecha (m³/s);

b - largura da brecha, em cada instante (m);

H - carga hidráulica sobre a brecha (m);

C - coeficiente de vazão do descarregador.

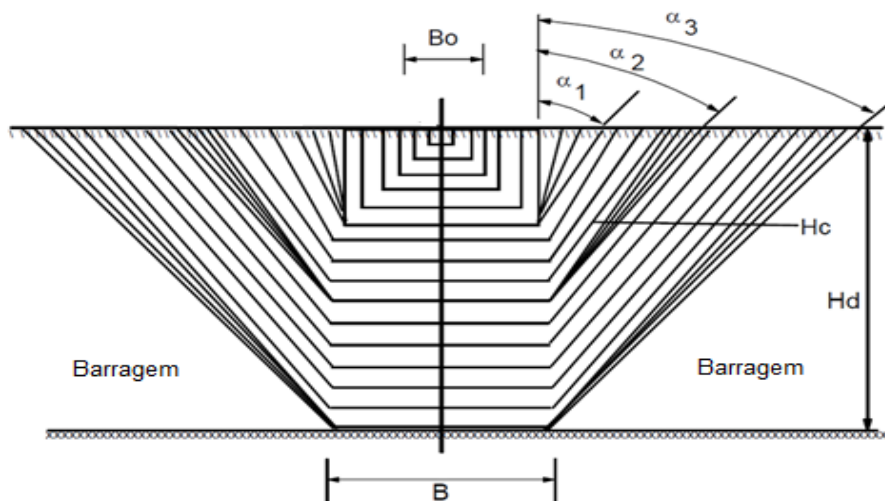




Figura 3.1 - Vista frontal da evolução geométrica idealizada da brecha de rotura de uma barragem de aterro. Adaptado de: Singh (1996).

A rotura de uma barragem de aterro e a sua evolução ao longo do esvaziamento da albufeira não é um fenómeno apenas consequente da erosão da brecha ou do escoamento que a atravessa. Assim este fenómeno processa-se da forma descrita na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Processo do avanço da brecha numa barragem de aterro - vista lateral.
Powledge (1989).

<p>Tempo de início da rotura: quando o caudal começa a passar sobre a brecha; o tempo de início da rotura termina no momento em que o tempo de formação da rotura se inicia.</p>

<p>Tempo de formação da rotura: período de tempo entre o início da erosão do paramento de jusante e o término da abertura da brecha; esta fase evolui com a erosão regressiva do paramento de jusante, desde a sua base até ao coroamento.</p>


3.4 Estimativas do hidrograma efluente da brecha baseadas nos dados do trabalho experimental

No presente trabalho determinaram-se hidrogramas efluentes da brecha através de duas formas distintas. Os dados das variáveis adquiridas combinados de forma conveniente permitiram obter duas estimativas indiretas do caudal efluente da brecha - Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Estimativas do caudal efluente da brecha.

2 Indiretas	<ul style="list-style-type: none">a partir da aplicação do princípio da continuidade no interior da albufeira: $Q_{\text{efl}} = Q_{\text{afl}} - \frac{dQ_{\text{albufeira}}}{dt}$a partir do cruzamento dos dados de nível no reservatório de jusante com a curva de vazão do descarregador desse reservatório;
--------------------	---

Seguidamente apresentam-se mais pormenorizadamente os métodos de aplicação de cada uma das estimativas anteriores.

3.4.1 *Balanço de massa na albufeira*

Com base nos dados de caudal afluente (adquiridos com o caudalímetro instalado à entrada na albufeira - Figura 4.10) e dos níveis de água na albufeira durante o evento de rotura (adquiridos com as sondas de nível resistivas distribuídas em várias posições na albufeira - Figura 4.9) é possível estimar o caudal efluente da brecha de forma indireta, aplicando o princípio da continuidade na albufeira, resumido esquematicamente na Figura 3.2.

A estimativa do caudal efluente da brecha com base no balanço de massa na albufeira é válida para caudais superiores a 80 l/s. Note-se que para os caudais mais reduzidos as variações de nível na albufeira são inferiores à amplitude do ruído do próprio sinal das sondas, pelo que para caudais reduzidos esta estimativa não é válida uma vez que os níveis adquiridos com as sondas distribuídas na albufeira também não o são.

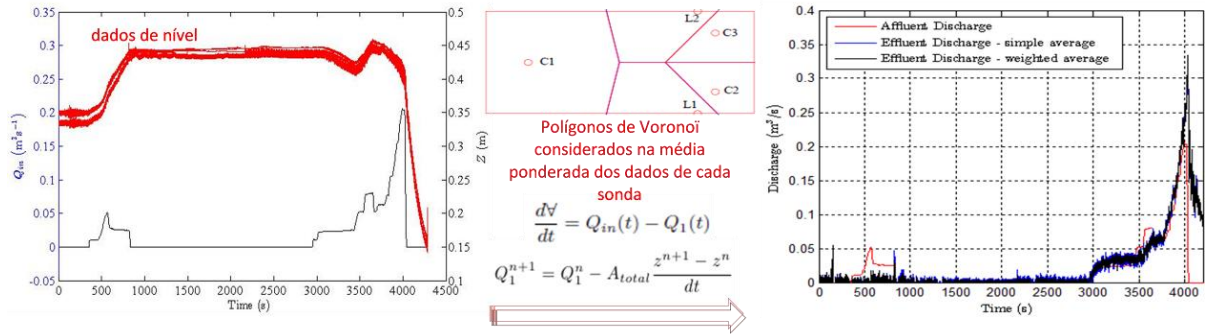


Figura 3.2 - Esquema da aplicação da estimativa indireta do caudal efluente da brecha com base num balanço de massas na albufeira.

3.4.2 Curva de vazão do descarregador do reservatório de jusante

Com base nos dados de nível de água no interior do reservatório de jusante durante o evento de rotura (adquiridos com uma sonda de nível resistiva colocada no interior de um copo de hidrômetro - Figura 3.3 - **Passo 1**) é possível estimar o caudal efluente da brecha de forma indireta aplicando a curva de vazão do descarregador de jusante deste reservatório com os dados de nível adquiridos com a sonda. Este método encontra-se resumido esquematicamente na Figura 3.3.

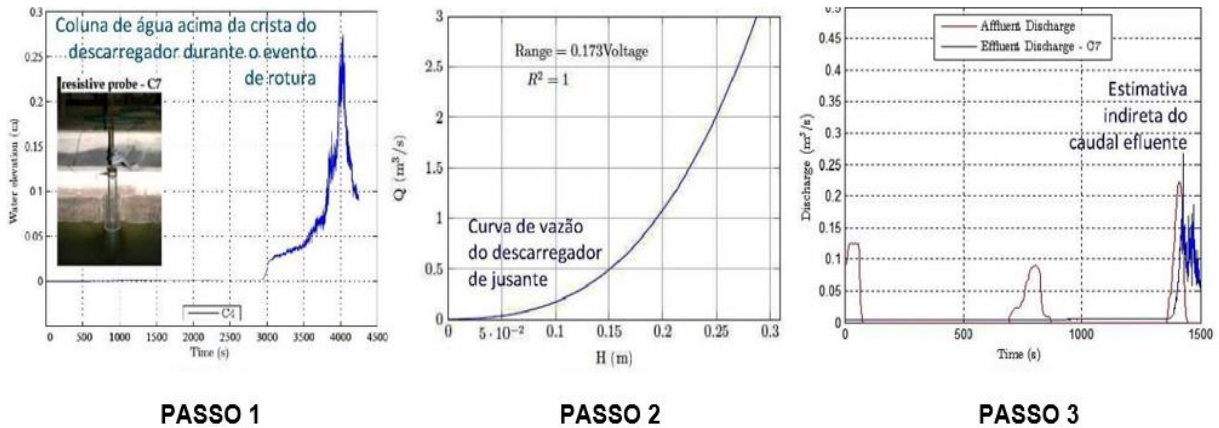


Figura 3.3 - Esquema da aplicação da estimativa indireta do caudal efluente da brecha com base na curva de vazão do descarregador de cheias do reservatório de jusante.

A estimativa do caudal efluente da brecha com base na curva de vazão do descarregador de cheias do reservatório de jusante é válida para caudais inferiores a 120 l/ s. Refira-se que para os caudais mais elevados o grau de perturbação no interior do reservatório de jusante é tão elevado que os dados de nível são muito afetados por esta agitação e por isso comportam muitos erros - Figura 3.4.



Figura 3.4 - Comportamento do escoamento no interior do reservatório de jusante para os maiores caudais.

Na gama de valores de caudal onde ambas as estimativas indiretas são válidas, verificou-se a concordância entre os caudais estimados a partir dos dois métodos indiretos.

Capítulo 4

Instalação Experimental e Instrumentação

4.1 Enquadramento

No presente capítulo descreve-se em detalhe a instalação experimental onde se realizaram os ensaios de rotura de barragens, assim como a instrumentação que foi adotada para adquirir dados dos ensaios. Alguma da instrumentação adotada requereu a utilização de condicionadores de sinal com *software* próprio para efetuar a aquisição de dados. Deste modo, apresentam-se também neste capítulo umas breves noções de cada um dos *softwares* utilizados.

4.2 Descrição da Instalação

A instalação onde se efetuaram os ensaios cujos resultados se apresentam nesta tese localiza-se no Pavilhão de Hidráulica Fluvial do Departamento de Hidráulica e Ambiente (DHA) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Na Figura 4.1 apresenta-se uma vista em planta da instalação, na qual se podem identificar, de montante para jusante, os seguintes elementos:

1. sistema de alimentação à instalação ($Q_{\text{máx}}^{\text{afluente}} = 200 \text{ l/s}$);
2. um reservatório representativo da albufeira ($V_{\text{máx}}^{\text{armaz}} = 60 \text{ m}^3$);
3. descarregadores laterais para manutenção do nível de água constante no interior da albufeira durante o período de interesse do ensaio; estes descarregadores laterais descarregam para caleiras laterais que acompanham a fronteira da instalação até ao final da mesma, descarregando para a caleira de jusante que conduz o escoamento proveniente da instalação de volta para o tanque inferior;
4. estrutura para colocação de aterros até 0.5 m de altura por 2 m de largura; acoplada a 3 estruturas de suporte para instrumentação, 2 fixas e 1 amovível (carrinho deslocável sobre carris);
5. bacia de recolha de sedimentos e respetivo descarregador de jusante (localizados na parte mais a jusante da instalação experimental).

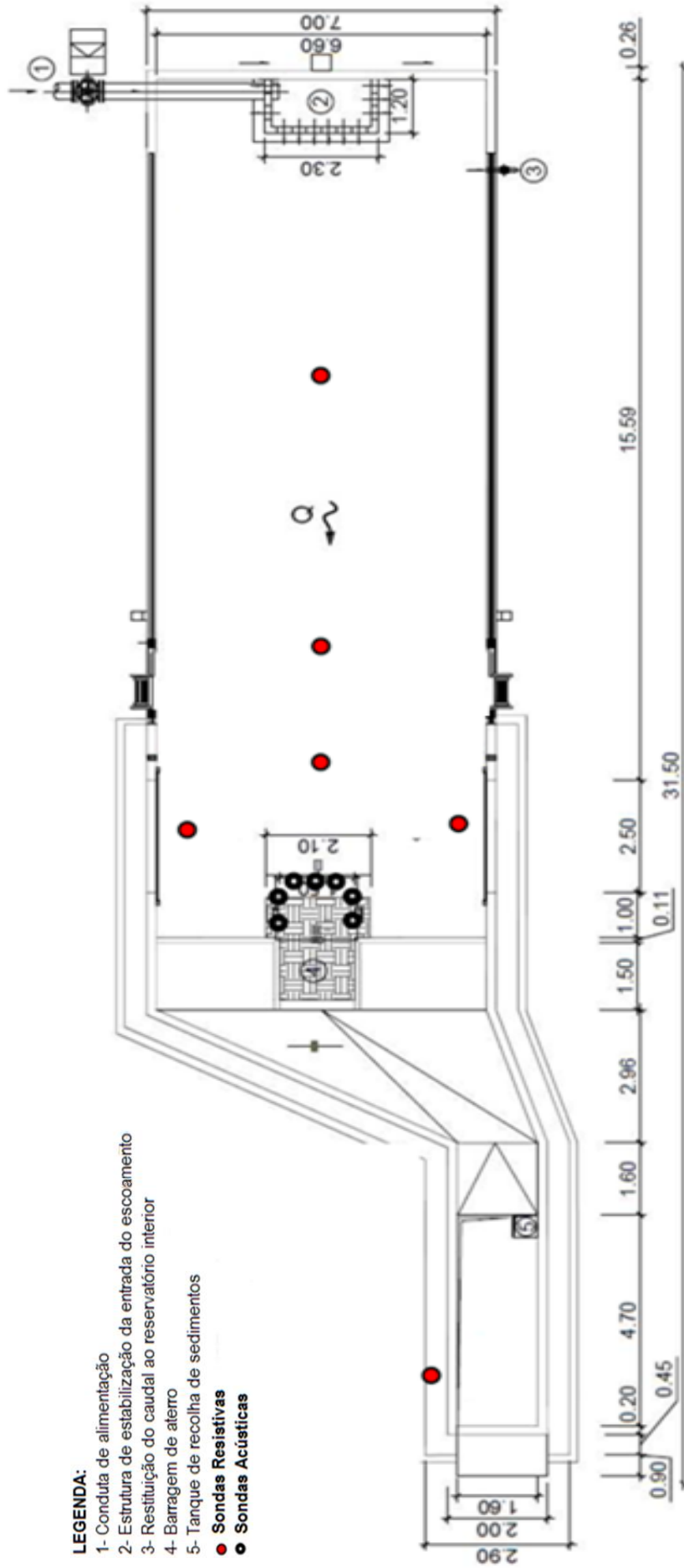


Figura 4.1 - Planta da instalação experimental.

Seguidamente descrevem-se mais em detalhe alguns dos elementos acima mencionados.

4.2.1 Sistema de alimentação

O sistema de alimentação de água à instalação experimental funciona em circuito fechado. A água é armazenada num reservatório subterrâneo com 90 m³ de capacidade de armazenamento e bombada para um reservatório superior com uma capacidade idêntica, que alimenta a instalação experimental por gravidade - Figura 4.2 (a) e (d). O sistema de bombagem tem uma capacidade máxima de 200 l/s - Figura 4.2 (b).

A entrada de água para a instalação efetua-se na fronteira de montante (no muro lateral direito) através de uma tubagem com Φ 350mm que aflui uma câmara de tranquilização constituída por uma caixa de tijolos perfurados que vão diminuir a agitação do escoamento à entrada para a albufeira - Figura 4.2 (f). O controlo do caudal afluyente ao modelo é efetuado através de uma válvula de seccionamento de controlo manual e registado através de um caudalímetro localizado na secção de entrada - Figura 4.2 (c). O controlo do caudal é de extrema importância uma vez que é necessário manter o nível de água na albufeira constante ao longo do ensaio, daí que o canal seja ininterruptamente alimentado. No reservatório de recolha de sedimentos localizado na secção de jusante da instalação, existe um descarregador que descarrega para um conjunto de caleiras implementadas a uma cota inferior, que permitem a restituição do caudal de saída do modelo para o tanque inferior - Figura 4.2 (e).



4.2.2 Albufeira e descarregadores laterais

A construção de uma barragem de aterro com uma altura máxima de 0.5 m, no local assinalado com o número 4 na Figura 4.1 permite criar uma albufeira com um volume máximo de armazenamento de 60m³ - Figura 4.3. No interior da albufeira existem 2 descarregadores laterais com 2,5 m de largura que auxiliam a manutenção no nível de água na albufeira durante o ensaio - Figura 4.4.

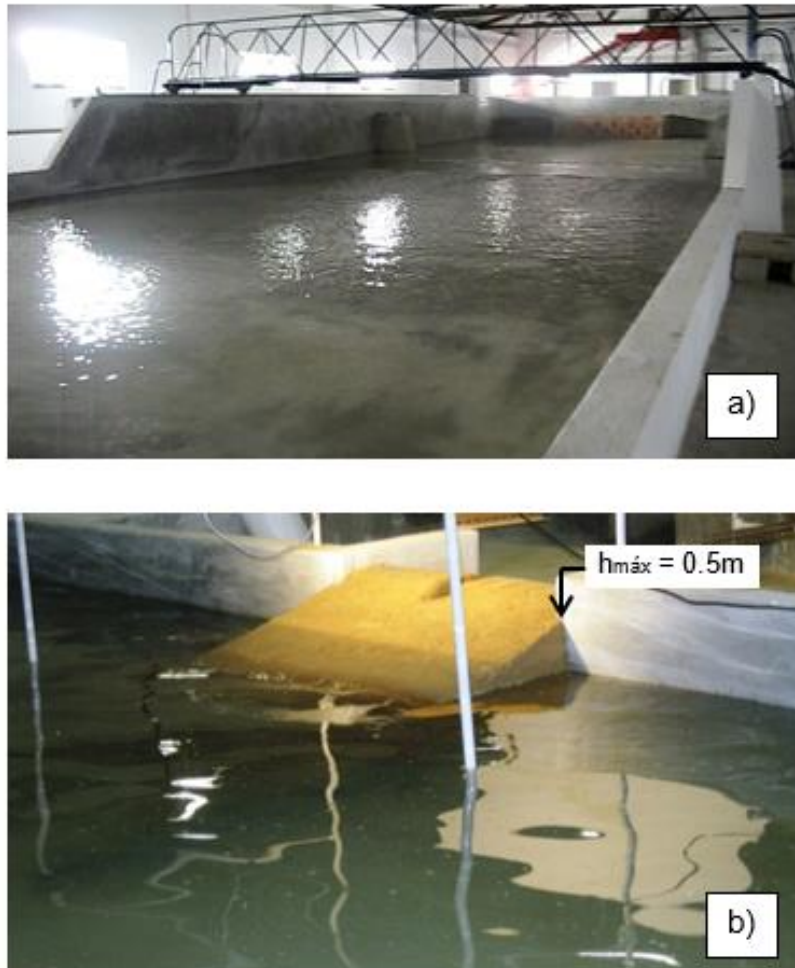


Figura 4.3 – a) Vista geral da albufeira; b) Vista a montante da barragem.



Figura 4.4 - Vista geral da albufeira vazia. Localização dos descarregadores laterais.

4.2.3 Local de implementação das barragens e estruturas de suporte à instrumentação

Conforme ilustrado na Figura 4.1, as barragens de aterro sujeitas a rotura por galgamento são construídas numa secção localizada 19 m a jusante da secção de entrada de caudal. O local de implementação das barragens encontra-se assinalado na Figura 4.5.

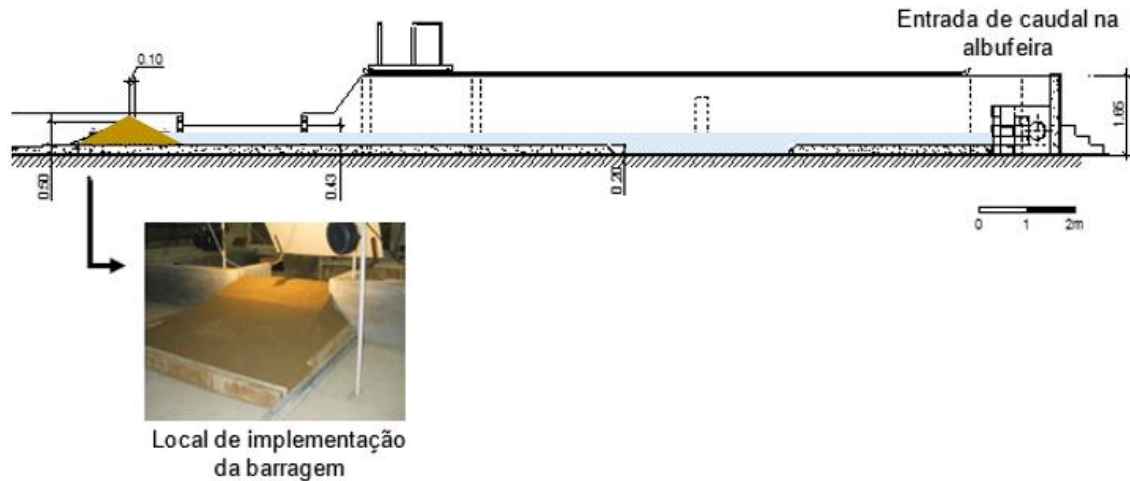


Figura 4.5 - Local de implementação da barragem.

4.2.4 Bacia de recolha de sedimentos

Aquando as realizações deste tipo de ensaios existem certas dificuldades que podem decorrer, sendo uma delas a quantidade de partículas de argila e areia em suspensão que se acumulam quando a água que se utiliza circula em sistema fechado, estas partículas podem assim transformar os dados que são obtidos, bem como danificar o próprio sistema de circulação. Por esta razão, foi adicionada à instalação uma bacia para a retenção dos sedimentos que derivam da rotura do aterro.

A bacia de recolha de sedimentos, localiza-se na parte mais a jusante da instalação experimental, com 4.70 x 1.60 x 1.00 m (comprimento x largura x profundidade - $V_{\text{armaz}} \approx 7.5 \text{ m}^3$). A mesma é composta por um descarregador localizado a jusante do aterro que tem como principal objetivo controlar e medir os caudais que surgem da rotura da barragem, em função dos níveis que se atingem na soleira. Estes valores só são obtidos posteriormente à realização do ensaio quando se procede à análise da curva de vazão deste descarregador. O descarregador apresenta 5m de comprimento, 1,6m de largura e 1m de profundidade. Note-se que a medição que é feita pelo mesmo é uma estimativa indireta, pois existe uma disparidade de tempo entre o caudal que de facto atravessa a brecha da barragem e o nível que é depois registado no descarregador. (Figura 4.6)



Figura 4.6 - a) Reservatório de Jusante; b) Descarregador a jusante do aterro.

4.3 Descrição da instrumentação

4.3.1 Medição de níveis de água

Sondas acústicas

A monitorização dos níveis de água, imediatamente a montante da barragem foi efetuada por recurso a 7 sondas de nível acústicas (Figura 4.7), distribuídas em torno da barragem na forma representada e a uma distância do fundo do canal de cerca de 0,80 m (portanto a $\approx 0,30$ m do nível de água no início do ensaio - $Z_{\text{água}}^{\text{inicial}} = 0,50$ m). A posição geral destas sondas pode ser visualizada na Figura 4.1.

Estas sondas são do tipo sensores ultrassónicos *U500 da Baumer* e têm como principais especificações: 1) intervalo de medição [0,10 m – 1 m]; 2) erro de medição < 0,5 mm; resolução < 0,3 mm; 4) sinal de saída [4-20mA / 0-10 V (corrente/tensão)].

As mesmas utilizam uma determinada frequência para ser possível detetar a distância a que se encontra qualquer objeto ou superfície com capacidade de reflexão da frequência emitida pela própria sonda. Para o caso da medição do nível da água na albufeira, onde o escoamento se processa de forma lenta estas sondas são capazes de medir com elevada precisão devido à constante horizontalidade da linha da superfície livre. Apresentam ainda a vantagem de se poderem colocar à superfície do escoamento, portanto têm um carácter não intrusivo.

Mesmo nos locais onde seria mais difícil obter leituras com sondas embebidas no seio do escoamento, como sejam locais do canal onde possa haver acumulação de sedimentos, estas sondas podem ser usadas sem qualquer tipo de interferência com o escoamento, continuando a adquirir dados coerentes.



Figura 4.7 - Sondas acústicas modelo UNDQ30U6103/S14 e Planta do posicionamento das sete sondas utilizadas durante os ensaios experimentais a montante do aterro.

Estas sondas requerem uma calibração prévia ao ensaio experimental para definir uma relação linear entre dois parâmetros distintos, distância à superfície do escoamento (d) e voltagem (V), correspondendo as distâncias máxima e mínima aos valores mínimo e máximo de voltagem que a sonda dispõe, que são respetivamente 0 e 10 V. A calibração é efetuada com o auxílio de um papel milimétrico, numa superfície plana, para garantir uma calibração eficaz, sendo que este processo se realiza da seguinte forma:

- 1- clica-se no botão “set” durante um período de 4 segundos até a sonda acender intermitentemente uma luz amarela, iniciando o processo de calibração;
- 2- coloca-se um objeto plano à distância mínima definida, neste caso de 10 cm e pressiona-se novamente o mesmo botão até a luz amarela estabilizar (parar de piscar);
- 3- coloca-se um objeto à distância máxima definida, neste caso de 60 cm e pressiona-se novamente o mesmo botão até a luz ficar azul o (como representado na Figura 4.7).

A Figura 4.8 mostra o processo descrito acima em que o operador posiciona a sonda por forma a que o primeiro ponto de reflexão do sinal, que corresponde a 0V, esteja colocado a 10 cm e o segundo ponto de reflexão de sinal, correspondente a 10V, esteja colocado a 60 cm.

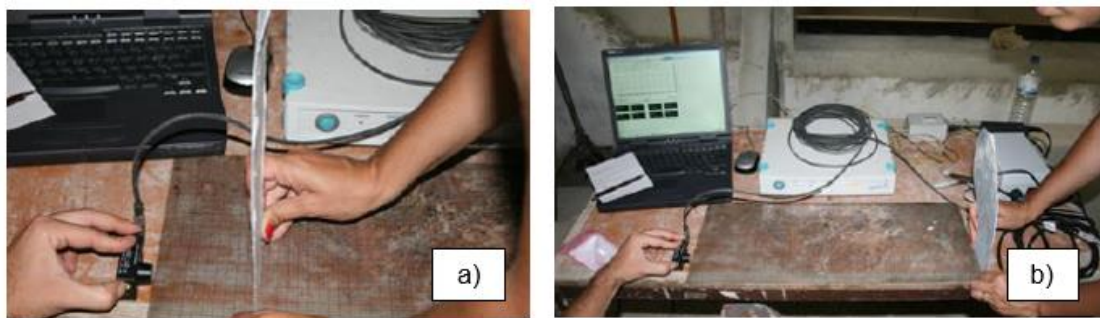


Figura 4.8 - Ilustração do processo de calibração das sondas acústicas.
a) limite de escala inferior – 10 cm (0 V); b) limite de escala superior – 60 cm (10 v).

Sondas resistivas

As sondas resistivas que foram utilizadas neste estudo experimental são também sondas de nível que permitem monitorizar os níveis de água durante o ensaio. Estas sondas são compostas por dois elétrodos posicionados paralelamente em aço inoxidável com um comprimento ajustável às cotas da água existentes no canal de ensaio.

O princípio de funcionamento destas sondas baseia-se na condutância entre os elétrodos ser diretamente proporcional ao comprimento de elétrodo que é inserido na água (o nível de água é aferido por uma diferença de potencial). Nos ensaios experimentais realizados foram adotadas 6 sondas resistivas (Figura 4.1): 5 distribuídas no interior da albufeira (Figura 4.8 a), e uma última, no interior da bacia de recolha de sedimentos, localizada imediatamente a montante do descarregador de jusante, por forma a monitorizar a coluna de água a cima da crista do mesmo (Figura 4.8 b).

Uma das vantagens deste tipo de sondas é que o efeito das variações de condutibilidade e temperatura da água tem uma reduzida influência na precisão das aquisições. Isto é importante no caso particular destes ensaios, na medida em que, o escoamento, à medida que se aproxima da brecha, torna-se hiperconcentrado (tem turbidez), apresentando zonas com diferentes condutâncias.

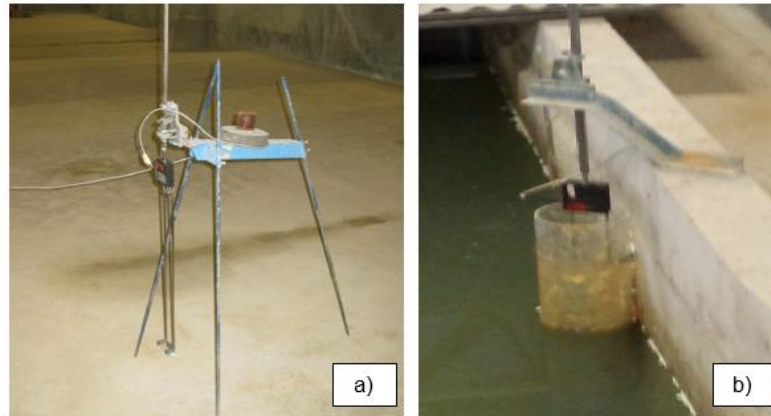


Figura 4.9 - Sondas de nível resistivas desenhadas e produzidas no Centro de Instrumentação científica do LNEC; a) Sonda resistiva no reservatório de montante; b) Sonda resistiva colocada no reservatório de jusante.

A relação entre a altura da água e a voltagem medida pelo *software* que é utilizado para este processo foi efetuada através da determinação de uma constante de calibração para cada sonda utilizada (Equação 4.1):

$$C_{cal} = \frac{a[L] - b[L]}{a[V] - b[V]} \quad (4.1)$$

onde $a[L] - b[L]$ refere-se à variação em altura e $a[V] - b[V]$ à variação da voltagem durante as medições que se realizam.

4.3.2 Medição do caudal de entrada

O caudal de entrada no modelo foi monitorizado através de um caudalímetro (Figura 4.10). O controlo do caudal foi efetuado manualmente com uma válvula de secionamento instalada na tubagem com Φ 350mm. O caudalímetro encontra-se ligado a um condicionador de sinal (*Spider8*) cujos dados de aquisição eram registados e armazenados por recursos ao *software* de aquisição, *CATMAN EASY* (apresentado em 4.3.4). A correção do caudal registado em “caudal real” foi efetuada por recurso à curva de calibração do caudalímetro.



Figura 4.10 - Caudalímetro existente na instalação experimental.

4.3.3 Aquisição de imagem

Câmaras de vídeo

Câmara de alta velocidade – CCD (Photonfocus e Mikrotron)

O sistema de aquisição de imagem implementado nestes ensaios comportava a utilização de duas câmaras de alta velocidade (*Photonfocus* (MV-1024E-CL) e *Mikrotron EoSens® 3CL*) - Figura 4.11.

As posições das câmaras de alta velocidade em relação ao aterro podem ser visualizadas na Figura 4.12.

A *Photonfocus* (MV-1024E-CL) foi implementada a montante da barragem, na diagonal, efetuando um ângulo de 45° com o paramento de montante da barragem. A *Mikrotron* foi implementada no topo, a uma distância de cerca de 2,70 m do ao coroamento da barragem de modo a visualizar o escoamento na aproximação e junto à brecha, assim como a própria evolução da erosão lateral da brecha.

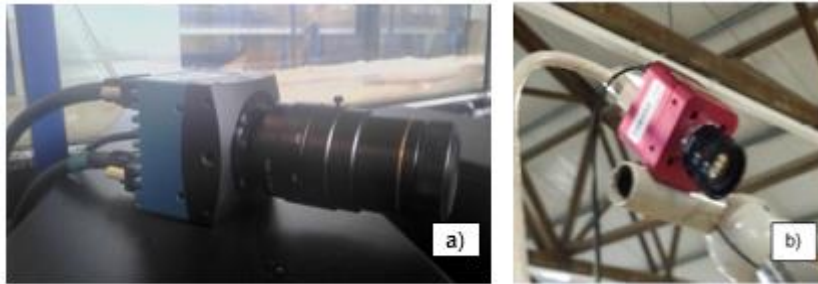


Figura 4.11 - Câmaras de alta velocidade monocromáticas; a) Mikrotrotron - EoSens ® 3CL High-Speed CMOS colocada verticalmente sob a barragem a uma distância de cerca de 2,70m do coroamento; b) Photonfocus MV-D1024E-160-CL-12 colocada na diagonal em relação ao paramento de montante da barragem.



Figura 4.12 - Posicionamento das câmaras de alta velocidade na instalação experimental.

A *Photonfocus* foi utilizada para visualizar a evolução da brecha do lado de montante. Uma vez que a caracterização da evolução da brecha é um dos objetivos deste trabalho, de modo que para enaltecer o contorno da brecha, colocou-se uma folha de laser de luz verde na secção da brecha permitindo observar a luz refletida nas paredes da zona crítica da brecha e ainda com o posicionamento da câmara fotográfica a montante da brecha. Só assim é possível a observação na totalidade da área que é erodida pela passagem da água no coroamento (Figura 4.13).

Um inconveniente associado aos ensaios é que estes ocorrem num local com deficiente iluminação e com uma quantidade de material em suspensão na superfície livre que acabam por influenciar a observação do comportamento da rotura do aterro.

A *Mikroton* é uma câmara fotográfica de alta velocidade com uma resolução máxima de 1710x1690 pixéis para a taxa de aquisição adotada (150 *fps*) (Figura 4.13 b). As imagens adquiridas com este equipamento, conforme se explicará no Ponto 6.3.1 foram posteriormente utilizadas para efeitos de aplicação de um algoritmo de LSPIV (*Large Scale Particles Image Velocimetry*), que permitiu determinar mapas de velocidade da superfície livre do escoamento na aproximação e junto à secção da brecha.

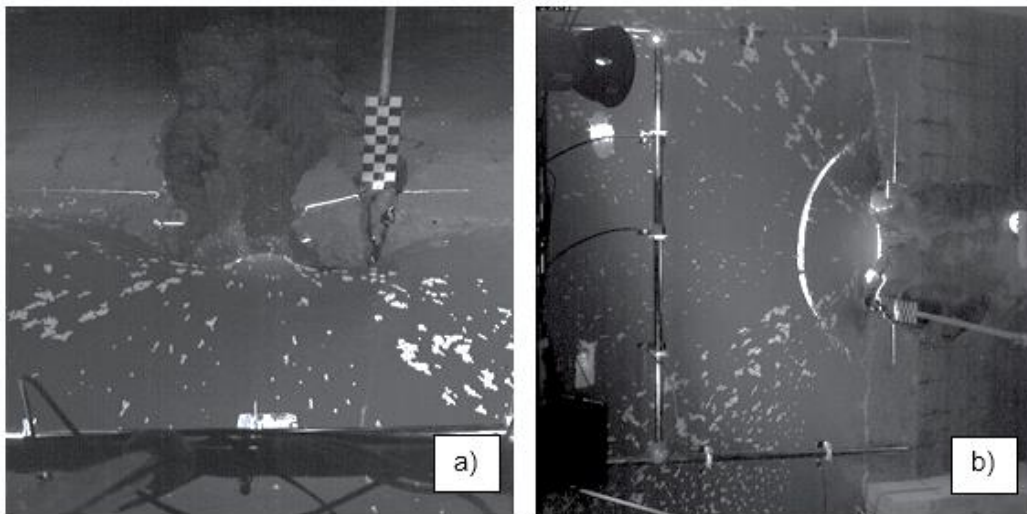


Figura 4.13 – a) Exemplo de imagem captada pela câmara de alta velocidade *Photonfocus*; b) Exemplo de imagem captada pela câmara de alta velocidade *Mikroton*.

Câmara digital HD

A jusante do aterro colocou-se uma câmara digital de vídeo (*CANON*) que tem como funções (Figura 4.14) registar a evolução da rotura da barragem e ainda registar o áudio de todos os acontecimentos durante o ensaio, algo que posteriormente se revela bastante importante na correlação entre a evolução física da brecha e dos dados que são registados pelas sondas. As imagens que são registadas por esta câmara permitem uma compreensão da evolução da rotura em tempo real, ou seja, do momento em que se processa a erosão inicial do paramento de jusante assim como da cedência estrutural do coroamento e ainda do colapso das paredes laterais da brecha. Por sua vez a câmara digital (*SONY*) que se encontra por cima do aterro apenas serve para monitorizar os ensaios em planta tendo apenas uma função auxiliar e não de registo de dados.

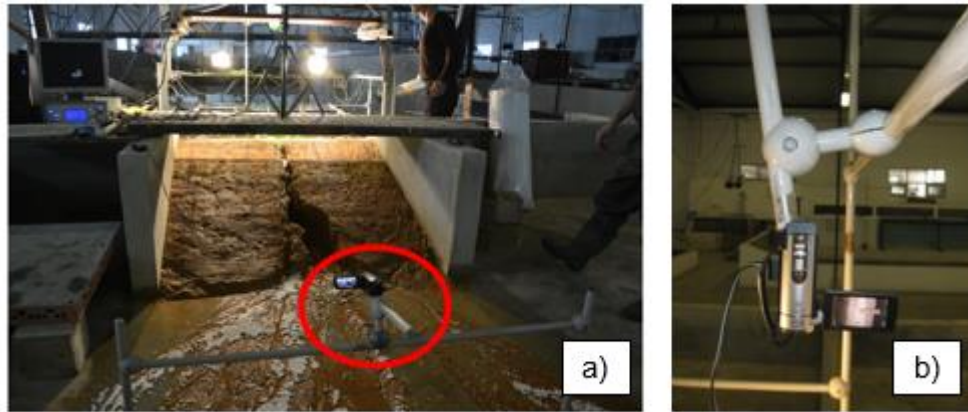


Figura 4.14 – a) Câmara digital utilizada para monitorização do paramento de jusante (CANON); b) Câmara digital para monitorização em planta do ensaio (SONY).

Kinect Sensor

Um dos processos que se acredita estarem na origem da ocorrência de episódios de erosão geotécnica é ocorrência de infraescavação, isto é, a criação de cavidades no paramento de jusante do aterro, devido a erosão hidráulica, que quando atingem dimensões muito elevadas, originam a queda das massas de solo localizadas sob as mesmas devido a falta de sustentação.

Para visualizar a existências destas cavidades, decidiu-se realizar um ensaio efetuando várias paragens (cortes no caudal afluente) e levantar a morfologia do aterro por recurso a reconstrução de superfícies 3D.

O equipamento escolhido - Kinect Sensor- tem como principal finalidade a utilização em videojogos nos quais é necessário detetar os movimentos do jogador. Este equipamento comporta 2 câmaras internas (uma de profundidade e uma câmara normal – *Red Green and Blue*), um projetor de infravermelhos e um microfone - Figura 4.15.

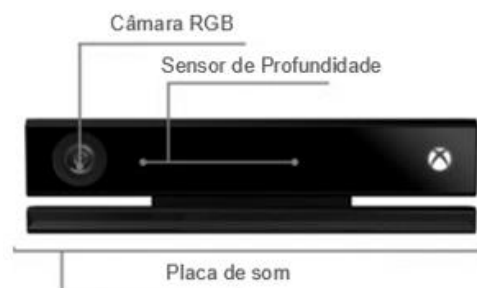


Figura 4.15 - Características do *Kinect Sensor*.

Quando se decidiu utilizar este equipamento na reconstrução 3D da superfície da brecha, encontraram-se várias dificuldades: i) não havia “*Know-How*” acerca da utilização deste equipamento (a equipa envolvida no trabalho experimental foi pioneira na utilização do mesmo); ii) o equipamento estava preparado para ser comandado pela consola de videojogos *Xbox* e não por outro meio (ou seja, não vinha preparado para aplicações experimentais).

Foi assim, necessário criar um código em *Matlab* para efetuar o controlo da aquisição e criar as nuvens de pontos assim como realizar uma série de testes para perceber as potencialidades e limitações deste equipamento para o objetivo pretendido. Foi igualmente necessário otimizar as condições de aquisição do *Kinect* às condições específicas dos ensaios experimentais.

O *Kinect Sensor* foi utilizado neste trabalho experimental, na reconstrução da morfologia da brecha em vários instantes temporais, nos quais a experiência laboratorial foi interrompida. Na Figura 4.16 apresenta-se a forma como o *Kinect* se implementou na instalação experimental, sendo que na mesma figura, no ponto c) se ilustra um dos três alvos utilizados para efeitos de referenciação das imagens do *Kinect* no software de processamento de dados.

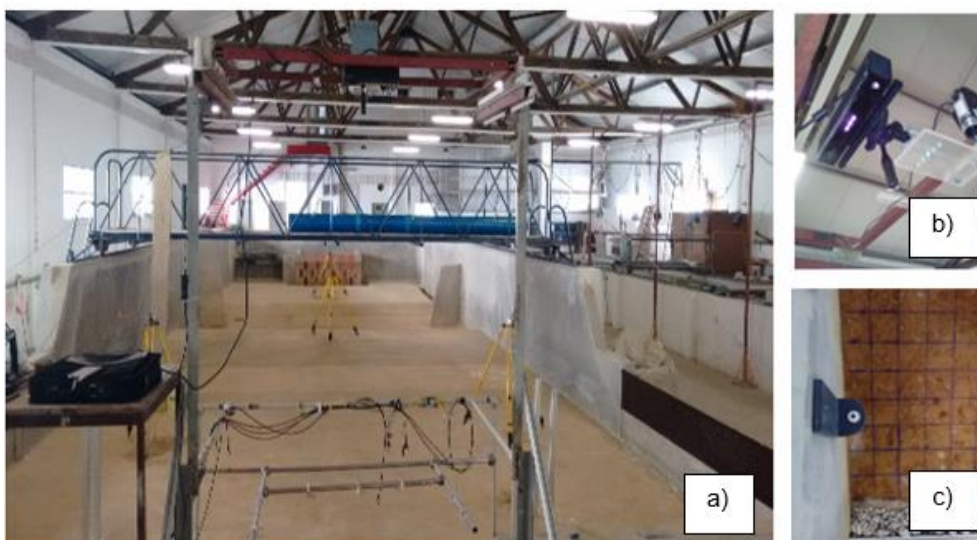


Figura 4.16 - a) Posicionamento do *Kinect Sensor* no ensaio experimental; b) pormenor do *Kinect Sensor*; c) Exemplo de um dos três alvos de referência utilizados na execução do ensaio.

Para o processamento das imagens adquiridas com o *Kinect Sensor* utilizou-se um software “*Open Source*” de processamento de nuvens de pontos e malhas - *CloudCompare*. Este software foi fundamental no processamento de dados 3D, uma vez que o mesmo, através de um conjunto básico de ferramentas para editar e compor nuvens de pontos, permitiu fazer retratos tridimensionais da barragem durante os vários episódios de rotura geotécnica. Para a determinação da totalidade das formas da barragem, inclusive da zona das cavidades, adquiriram-se imagens de profundidade com o *Kinect* em várias posições, até efetuar o completo varrimento da barragem. A interligação das imagens (“merging process”) foi efetuada por recurso a três de quatro alvos de coordenadas (Figura 4.16 c) conhecidas implementadas ao redor da barragem. Ou seja, garantiu-se que cada imagem adquirida conseguia visualizar pelo menos 3 pontos de coordenadas conhecidas (alvos), por forma a conseguir remeter todas as imagens a um mesmo referencial.

Dispensadores de partículas de Poliestireno

Para efeitos de aplicação do algoritmo de *LSPIV*, cuja explicação se apresenta no ponto 6.3.1 foi necessário adicionar ao escoamento partículas traçadoras de poliestireno (esferovite). Este método utiliza o deslocamento destas partículas (variação espacial entre instantes temporais) para determinar o campo de velocidades instantâneas do escoamento no interior do volume de controlo analisado. A taxa de adução destas partículas ao escoamento deve ser aproximadamente constante, assim como a distribuição espacial na superfície do escoamento deve ser aproximadamente homogénea.

Para garantir uma taxa constante de adução e homogeneidade na distribuição das partículas utilizaram-se três dispensadores mecânicos distribuídos em torno da barragem, a uma distância mínima do aterro que não influencia as características do escoamento (Figura 4.17). Os mesmos são compostos por meias canas com uma furação na parte inferior com espaçamentos reduzidos entre orifícios.

A adução de partículas ao escoamento é efetuada através da vibração destas meias canas induzida pela ativação de motores de pequena dimensão. Estes geram a vibração das tubagens levando a que as partículas de esferovite atravessem os orifícios e “caiam” para o escoamento, como se mostra pela (Figura 4.18).

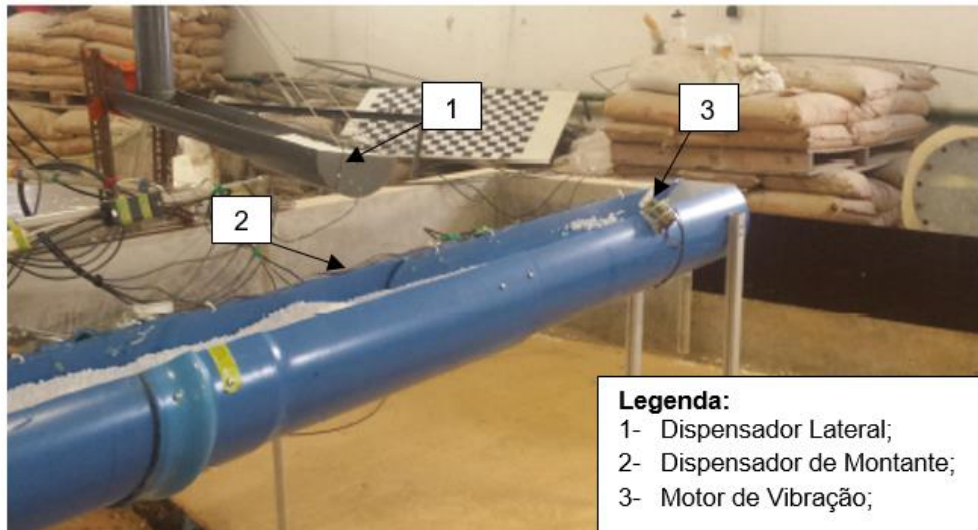


Figura 4.17 - Dispensadores de partículas de poliestireno utilizados durante os ensaios experimentais.



Figura 4.18 - Ilustração da queda de partículas de esferovite.

Sistema de iluminação

Iluminação de elevada potência - LASER QUANTUM

Conforme referido anteriormente, a visualização do contorno da brecha nas imagens adquiridas com a câmara *Photonfocus*, só foi possível devido à interseção de uma folha de laser vertical de luz verde com o corpo da barragem (interface água-barragem). O tipo de laser adotado foi um laser *Quantum* da *Metflow* que emitia um feixe de luz na região do verde ($\lambda = 532 \text{ nm}$) com 6W de potência. A criação da folha de laser foi conseguida por recurso a uma lente cilíndrica que permitiu abrir o feixe do laser 60° para cada lado - Figura 4.19b.

Refira-se ainda que este tipo de equipamento apresenta diversos riscos de utilização, uma vez que se efetuaram os ensaios com a potência máxima, tendo sido necessário seguir os respetivos procedimentos de segurança, nomeadamente utilizar óculos de proteção, assim como evitar o contacto direto com a folha de laser.

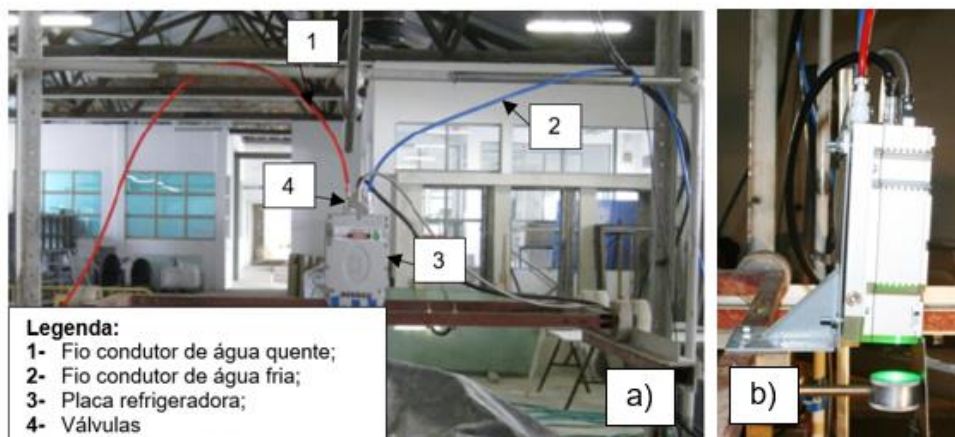


Figura 4.19 - Laser. a) Esquema de montagem; b) pormenor da lente cilíndrica.

Devido à elevada potência de operação do laser (6 W), o mesmo atinge temperaturas muito elevadas, chegando muito rapidamente a 40°C, que corresponde à temperatura máxima de funcionamento. Por razões de segurança, ao atingir esta temperatura o laser desliga-se automaticamente. Desta forma, o laser vem com um sistema de refrigeração incorporado por forma a evitar que se atinja a temperatura máxima de operação. Esta refrigeração é composta por uma entrada de água fria (bombada à pressão da rede) para o interior da placa refrigeradora (a qual procura manter um equilíbrio térmico, arrefecendo o laser) e por uma saída de água quente como se indica na Figura 4.19 a).

Iluminação para enaltecimento do contraste das imagens

A iluminação da superfície do escoamento durante a realização dos ensaios experimentais é fundamental para enaltecer o contraste entre o fundo escuro (escoamento) e o branco (partículas de esferovite) para efeitos de aplicação do algoritmo de LSPIV para determinação dos mapas de velocidade instantâneos do escoamento. A forma como os dois holofotes se encontravam implementados na instalação está representada na Figura 4.20.



Figura 4.20 - Posicionamento dos holofotes em relação às barragens. Pormenor do holofote.

4.3.4 Sistemas de aquisição de sinal e seus softwares

Spider 8 e CATMAN EASY

O condicionador de sinal *Spider8* é um equipamento que permite efetuar a aquisição de dados de vários tipos de sondas. Tem oito canais de entrada, pelo que permite adquirir dados de 8 sondas em simultâneo (que podem ser de tipos diferentes) - Figura 4.21.

No caso dos ensaios realizados adquiriram-se com este equipamento os dados das 6 sondas resistivas implementadas na albufeira (em número de 5) e a montante do descarregador de jusante (1 sonda) e os dados do caudalímetro.

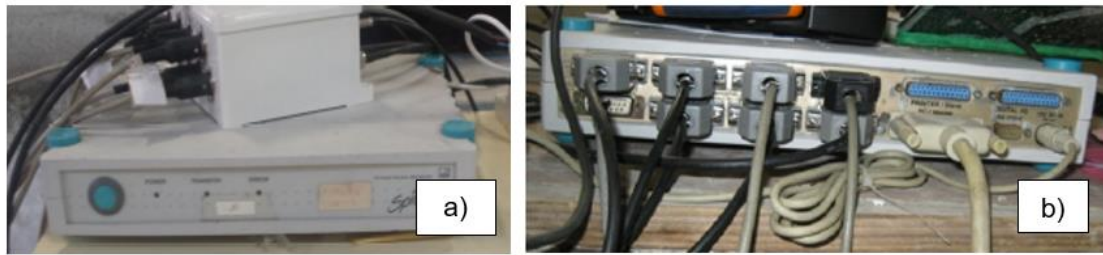


Figura 4.21 - a) Hardware Spider 8; b) Recepção de sinal das sondas.

O software de manuseamento deste condicionador de sinal é o *CatmanEasy* que possibilita a visualização das leituras em tempo real e que, por isso permite ir avaliando se as mesmas se encontram dentro do expectável. Na Figura 4.22 podem visualizar-se um ecrã do *CatmanEasy* no qual se pode observar os dados fornecidos por este software quando as sondas se encontram em atividade.

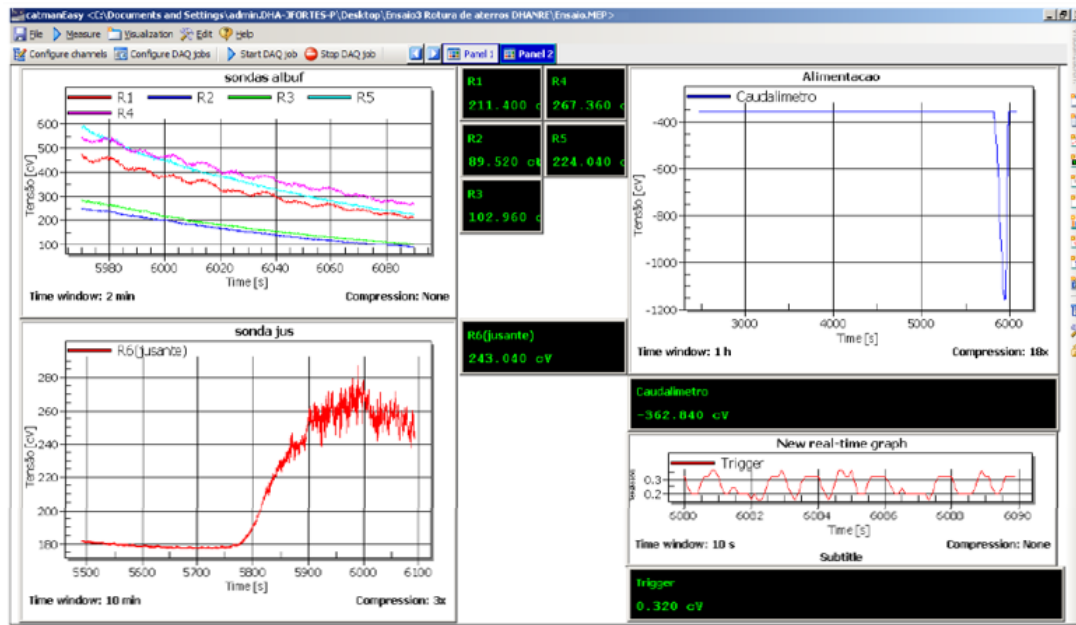


Figura 4.22 - Software CatmanEasy conectado com as seis sondas resistivas e com o caudalímetro.

Placas de aquisição da National Instruments (NI) e Labview Signal Express

Para ser possível a receção de informação do conjunto de sondas acústicas a adquirir ao mesmo tempo durante a realização de um ensaio experimental foi necessário utilizar uma placa de aquisição de sinal (DAQ-NI9203). A acompanhar este equipamento tinha-se o software de medições interativas - *Labview Signal Express*, que apresenta como função básica o processamento dos sinais enviados pelas sondas de uma forma rápida e sem qualquer tipo de programação - Figura 4.23.



Figura 4.23 – Esquerda: Placa de aquisição de sinal das sondas acústicas (DAQ - NI 9203 - IST); Direita: chassis de alimentação da placa (NI cDAQ - 9172 - CIC).

Capítulo 5

Ensaaios Experimentais

5.1 Descrição dos ensaios realizados

O presente trabalho de mestrado acompanhou a realização de três ensaios experimentais (Ensaios 1, 2 e 3). As principais características destes ensaios são apresentadas na Tabela 5.1, sendo que na Figura 5.1 se apresenta uma imagem frontal de cada barragem ensaiada com uma pormenorização da geometria do canal piloto.

Tabela 5.1 - Principais características geotécnicas dos ensaios realizados.

Designação	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3 – Kinect Sensor
Tipo de barragem	Homogénea (*)	Homogénea (*)	Homogénea (*)
Geometria inicial da Brecha	Triangular	Retangular	Triangular
Dimensões	10x5,0 cm	10x5,5 cm	10x5,0 cm
W (%) / Y_d (kN/m ³)	7,3 / 18,41	7,5 / 18,37	7,8 / 17,7
Grau de Compactação (%)	94	94	94
H – Altura do aterro (m)	0,48	0,48	0,45
L coroamento (m)	0,17	0,17	0,17
Declive Montante/Jusante	1V:2H / 1V:2.5H	1V:2H / 1V:2.5H	1V:2H / 1V:2.5H

w - Teor em água; Y_d - peso volúmico seco; (*) com dreno de pé de jusante;



Figura 5.1 - Vista frontal das barragens construídas e canal piloto. Ensaio 1 e Ensaio 3 (*Kinect Sensor*) - geometria triangular. Ensaio 2 - geometria retangular;

Os Ensaios 1 e 2 foram efetuados com canais pilotos com geometrias distintas, triangular e retangular (Figura 5.2 a) respetivamente. No Ensaio 3 (*Kinect Sensor*) o canal piloto apresentou a mesma forma triangular que no Ensaio 1 (Figura 5.2 b).

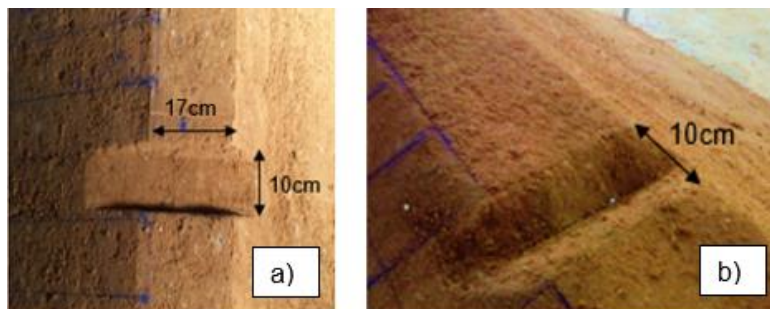


Figura 5.2 - Canais piloto dos ensaios realizados a) Ensaio 2 - geometria retangular; b) Ensaio 1 e 3 (*Kinect Sensor*) – geometria triangular.

5.2 Análises efetuadas em cada ensaio

Conforme mencionado em 5.1 realizaram-se 3 ensaios distintos durante o decorrer deste trabalho.

Os primeiros dois ensaios (Ensaio 1 e 2) serviram para:

- estimar o caudal efluente da brecha através dos métodos especificados no ponto 3.4 (balanço de massas na albufeira e curva de calibração do descarregador de jusante);
- efetuar uma análise detalhada da relação entre a hidrodinâmica do escoamento junto à brecha e a morfologia da brecha ao longo do tempo, em particular no que respeita a ocorrência súbita de episódios de erosão geotécnica.

O último ensaio (Ensaio 3) realizou-se apenas com o objetivo de efetuar uma reconstrução 3D da morfologia da brecha no final do ensaio com o *Kinect Sensor*.

5.3 Descrição do procedimento experimental

No capítulo anterior apresentou-se a descrição do equipamento, *software* de aquisição e acessórios necessários à realização de um ensaio de rotura. No entanto para a realização de um ensaio de rotura válido e devidamente monitorizado é necessário utilizar os procedimentos e sequências que se seguem (Tabela 5.2 a 5.4).

Tabela 5.2 - Conjunto de atividades a realizar uma semana antes da concretização do ensaio experimental.






Semana anterior ao ensaio – Construção do Aterro	
	1.1. Garantir que existe material suficiente disponível junto à instalação para a construção de um aterro;
	1.2. Efetuar a mistura de solos, caso os ensaios a realizar sejam coesivos;
	1.3. Humidificação do solo;
	1.4. Construção do aterro por camadas recolhendo 2 provetes/camadas alternadas (Camadas 1, 3 e 5);
	1.5. Efetuar a análise geotécnica dos provetes;
	1.6. Talhar o canal piloto da brecha no coroamento;
	1.7. Fazer grelha de referência no paramento de jusante da barragem com fio “bate linhas”;
	1.8. Colocar esferovite suficiente para a realização de um ensaio no interior dos dispensadores;
	1.9. Instalar o Laser Quantum:
	1.9.1. Caixa condicionadora de sinal;
	1.9.2. Circuito de arrefecimento (montar manguerias de ligação da água da rede ao sistema de arrefecimento e de saída de água quente);
	1.9.3. Averiguar a potência máxima de funcionamento para as condições térmicas ambientais do dia do ensaio (a temperatura máxima do laser é dependente da temperatura ambiente).

Tabela 5.3 - Conjunto de atividades necessárias na véspera à realização do ensaio experimental.





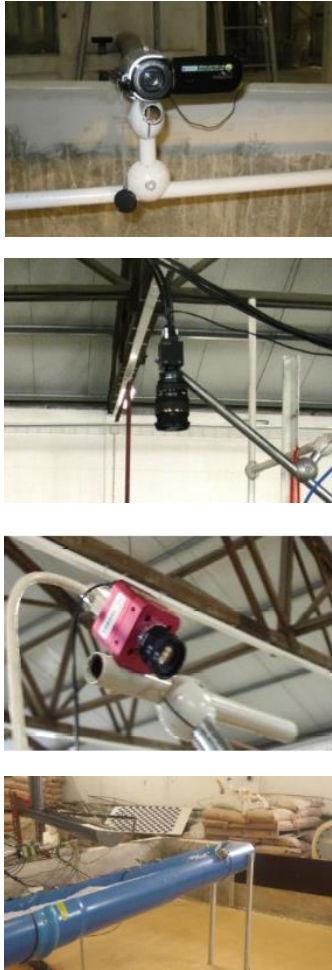
Dia anterior ao ensaio	
	2.1. Dispor todas as fichas triplas, quádruplas e de rolo, necessárias para ligar todos os equipamentos e tratar de todos os acessórios relacionados com a alimentação dos equipamentos para monitorização do ensaio;
	2.2. Calibrar e instalar as sondas de medição de níveis de água na instalação (acústicas e resistivas):
	2.2.1. Calibrar e instalar as sondas acústicas em torno da barragem;
	2.2.2. Calibrar e instalar as sondas resistivas distribuídas na albufeira e na bacia de retenção de sedimentos (no interior de cilindro acrílico).
	2.3. Encher os tanques inferior e superior de alimentação ao canal de ensaios (devem estar no nível máximo);
	2.4. Verificar o funcionamento do caudalímetro;
	2.5. Encher o reservatório da bacia de retenção de sedimentos até ao nível da crista do descarregador de jusante;
	2.6. Montar os holofotes nas posições de destino.

Tabela 5.4 - Conjunto de atividades necessárias no dia do ensaio.

Dia do Ensaio	
	<p>3.1. Montar as câmaras de alta velocidade, preparar os respetivos sistemas de aquisição e calibrar as imagens a adquirir;</p> <p>3.1.1. <i>Photonfocus</i>, no suporte a montante da barragem, na diagonal ao paramento de montante da mesma - calibrar com o auxílio de uma placa de xadrez vertical com células de 2 x 2cm (6 x 20 cm-Largura x Altura);</p> <p>3.1.2. <i>Mikroton</i>, de topo, sob o coroamento da barragem (a cerca de 2,7 m do coroamento da barragem) - calibrar com o auxílio das régua horizontais do flutuador e de uma placa de xadrez horizontal com células de 6x6cm (78 x 94cm-Largura x Altura);</p> <p>3.2. Montar as câmaras HD nos locais de destino:</p> <p>3.2.1. Câmara para monitorização do paramento de jusante da barragem (<i>CANON</i>);</p> <p>3.2.2. Câmara para visualização de topo colocada sob o carrinho de instrumentação, a cerca de 1,5 m do coroamento da barragem (<i>SONY</i>);</p> <p>3.3. Encher as meias canas do dispensador de esferovite e encher também os tubos verticais de alimentação às meias canas laterais-</p>

Após o término do ensaio, existe também um “protocolo” a seguir, nomeadamente:

- 1) a instalação tem de ser limpa (os restos da barragem que não foram erodidos têm de ser removidos e o reservatório de recolha de sedimentos tem de ser esvaziado e os sedimentos depositados têm de ser removidos);
- 2) todos os equipamentos e suportes auxiliares, passíveis de desaparecerem ou se estragarem por estarem expostos durante o período de tempo entre ensaios, ou porque atrapalham a construção de um novo aterro, são devidamente guardados bem como, todos os equipamentos emprestados por outras instituições, nomeadamente pelo IST (entre outras) que estejam a ser utilizados por vários usuários em simultâneo, são devolvidos até serem novamente necessários (ensaio seguinte). Note-se que esta devolução entre ensaios é necessária, porque a duração média da preparação total de um ensaio é cerca de 2 semanas.

5.4 Caracterização Geotécnica dos Ensaios

No âmbito deste trabalho foram realizados três ensaios experimentais de rotura por galgamento de barragens de aterro na instalação experimental apresentada no ponto 4.2.

O solo adotado na construção das barragens de aterro foi submetido a vários testes geotécnicos para ser possível a sua caracterização. O mesmo corresponde a um solo “real”, ou seja, não resultou da mistura de vários solos “reais” com curvas granulométricas distintas.

Nos pontos 5.4.1 e 5.4.2 apresentam-se respetivamente a curva granulométrica do solo utilizado assim como as condições de compactação implementadas.

5.4.1 Curva granulométrica e Classificação do Solo

Conforme já referido este trabalho insere-se no âmbito de um trabalho de doutoramento que se encontra a decorrer, assim surge na sequência de outras teses de mestrado realizadas no mesmo âmbito. Desta forma, a tese de mestrado realizada por Santos (2016) encarregou-se da caracterização do solo adotado nos ensaios, sendo que de acordo com a mesma, o solo utilizado se classifica como uma **areia siltosa** de acordo com o *Sistema Unificado de Classificação de Solos* (LNEC, 1966), recorrendo à curva de distribuição (Gráfico 5.1) e aos respetivos limites de consistência.

A curva granulométrica representada no Gráfico 5.1 resultou de uma análise granulométrica de ambas as frações do solo, grossa e fina, respetivamente através da peneiração e da sedimentação do material (Tabela 5.5). Este solo foi assumido como um solo apropriado para a realização dos ensaios pretendidos na medida em que, se pretendia ensaiar barragens de aterro com alguma coesão, pelo que seria necessário a presença de uma fração não desprezável de finos. Dos vários solos ensaiados (e cuja análise não é apresentada no âmbito deste estudo) decidiu-se que os ensaios seriam executados com esta areia siltosa por a mesma responder ao propósito referido.

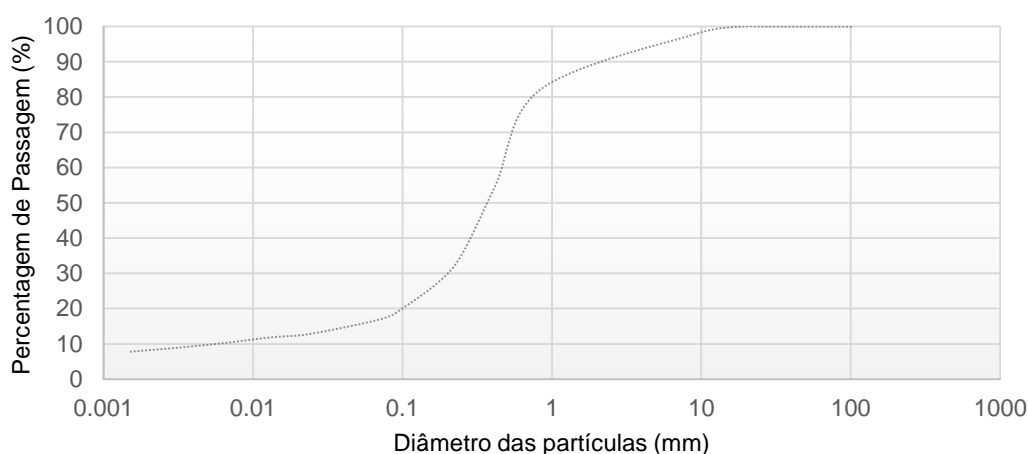


Gráfico 5.1 - Representação da Curva Granulométrica (Santos, 2016).

Tabela 5.5 - Peneiração do solo utilizado.

1	<i>D</i> (μm)	1,5	3,5	7,2	10,1	14,3	24,6
	% de Passagem acumulado	7,8	9,1	10,5	11,3	12,0	12,9
2	Standard Mesh (Tyler)	200	140	80	60	40	20
	φ (mm)	0,074	0,105	0,177	0,25	0,42	0,841
	% de Passagem acumulado	17,2	20,7	27,8	35,4	55,1	82,2
3	Abertura (in)	3/8 "	3/4 "	1 "	2 "	3 "	4 "
	φ (mm)	9,51	0,105	19	25,4	50,8	76,2
	% de Passagem acumulado	98,1	100	100	100	100	100

5.4.2 Condições de compactação

A compactação dos solos existe para ser possível reduzir o volume de ar presente nos vazios do solo e conseqüentemente aumentar o peso volúmico do próprio solo, aumentando assim a resistência e diminuindo a permeabilidade do mesmo. É esta a razão pela qual este processo físico faz parte da construção de uma barragem de aterro. As condições de compactação a implementar nas barragens a construir foram estudadas tendo-se definido as características a implementar nas barragens a ensaiar. Para garantir as características de compactação ótimas do solo utilizado nos ensaios experimentais efetuou-se um *Ensaio Proctor Standard* com uma amostra de solo, tendo-se obtido uma correlação entre o teor em água e o peso específico seco quando compactado com determinada energia. Este ensaio foi realizado de acordo com as diretrizes EN 13286-2. A curva de compactação resultante do Proctor é dada pelo Gráfico 5.2 (Santos, 2016).

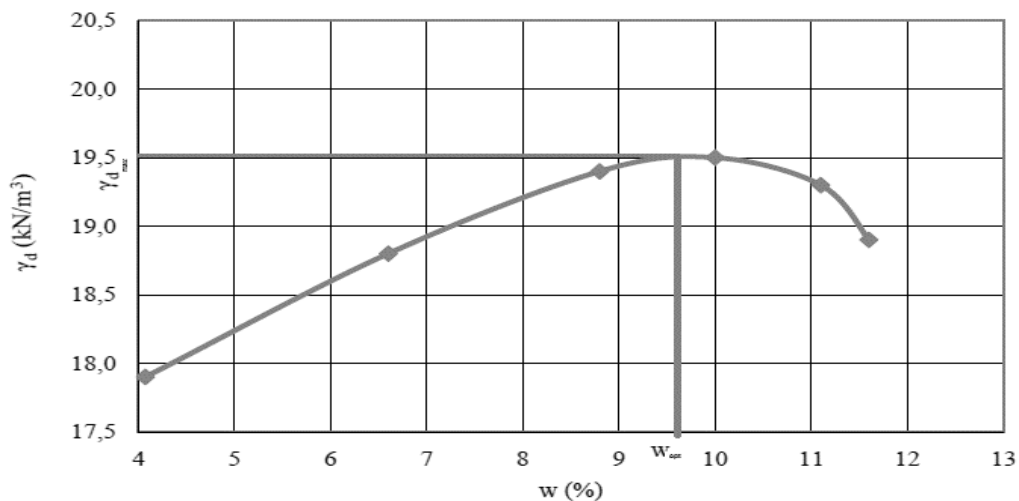


Gráfico 5.2 - Curva de Compactação - Ensaio Proctor (Santos, 2016).

Para o caso em estudo foi adotada cerca de 25% da energia de compactação advinda do Ensaio Proctor, que significa um decréscimo da mesma. Este decréscimo foi escolhido para reduzir a resistência e a permeabilidade das barragens a ensaiar e assim promover uma rotura mais rápida. Com este decréscimo, as condições ótimas de compactação corresponderam a um teor em água superior e um peso específico seco inferior. O Gráfico 5.3 mostra a curva de compactação para a nova energia aplicada (25% da energia de referência do *Ensaio Proctor Standard*) bem como os valores ótimos de teor em água ($w=11\%$) e do peso específico seco ($\gamma_d=18,8 \text{ kN/m}^3$).

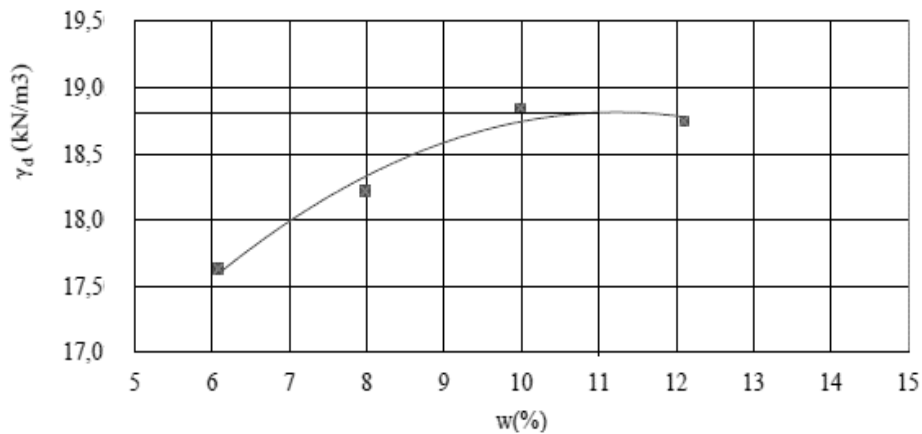


Gráfico 5.3 - Curva de Compactação - 25% do Ensaio Proctor (Santos, 2016).

Relativamente à importância da compactação no processo da rotura, refira-se que na maioria dos estudos laboratoriais de rotura de aterros o método de compactação não tem sido valorizado, sendo a compactação manual o método mais frequente. Mas, do ponto de vista geotécnico, um aterro compactado manualmente não é uma representação fidedigna em modelo reduzido de um aterro real sendo que o grau de significância dos efeitos de escala não pode ser avaliado com base em aterros compactados deste modo, por esta razão os ensaios que foram elaborados tiveram uma compactação mecânica (à percussão), recorrendo a uma placa de compactação de baixo peso.

5.5 Construção do Aterro

5.5.1 Implementação do teor em água alvo

Após a aquisição destes dados foi possível começar a preparar a construção do aterro experimental. A medição do teor em água do solo é a primeira tarefa a ser realizada, uma vez que o solo se encontra armazenado no interior do pavilhão da instalação experimental durante longos períodos de tempo, podendo alterar o seu estado de humidade em relação à última amostra recolhida. Para tal, antes do início da construção do aterro eram colhidas duas amostras de solo para efeitos de análise do teor em água (Leonardo, 2016)

Já que os dois ensaios experimentais aqui apresentados procuram reproduzir dois outros ensaios realizados previamente, adotou-se a mesma a energia de compactação adotada previamente, ou seja, 94% do valor de referência advindo do *Teste Proctor Standard* com uma redução de 25%. O resultado foi uma percentagem aproximada do teor em água de cerca de 8% com um peso volúmico seco ao redor dos 18kN/m³.

Visando conseguir implementar no solo o teor em água alvo (8%) retirou-se uma amostra de solo que foi pesada antes e depois de seca (num forno para secagem) por forma a determinar o teor em água do solo e assim calcular a quantidade de água que é necessária adicionar à massa de solo por forma a obter o teor em água pretendido. Os resultados obtidos concluíram que para as condições de humidade do solo que se encontrava armazenado no interior do pavilhão, por cada 100kg de solo deveriam ser adicionados 5 litros de água para alcançar os 8% de teor em água.

A mistura de água / solo foi realizada com o auxílio de uma betoneira com o intuito de garantir a homogeneidade da mistura (uma característica essencial numa barragem de aterro).

5.5.2 Processo de compactação

Já o processo de compactação foi realizado com o auxílio de uma placa de compactação PC1010 da *Euro Shatal* (Figura 5.3) com uma base retangular de dimensões 300x430mm e com uma frequência de vibração de 100Hz. Para atingir os 94% de grau de compactação pretendidos foi necessário efetuar três passagens da placa por cada camada de aterro.



Figura 5.3 - Compactador PC1010 da *Euro Shatal* utilizado na compactação do aterro.

As barragens de aterro construídas utilizaram um modelo de construção por camadas, constituído por um conjunto de cinco camadas com altura aproximada de 10 cm após compactação, para garantir condições homogéneas de compactação. Na Figura 5.4 é possível observar a construção da 3ª e 4ª camadas da barragem. Depois de executar esta tarefa, escarifica-se um pouco a superfície da camada, assegurando assim a acoplagem entre camadas, e prossegue-se para a camada seguinte. O esquema final do aterro após o processo de compactação apresenta-se na - Figura 5.5.



Figura 5.4 - a) Processo de compactação da 3.^a camada da barragem; b) Morfologia do aterro após a compactação da 4.^a camada.

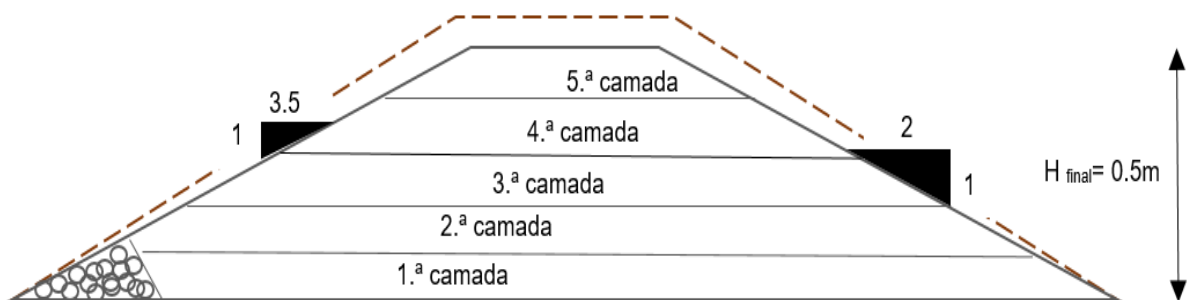



Figura 5.5 - Esquema final do aterro após o processo de compactação.

5.5.3 Provetes para controlo da compactação

Na terceira e na quinta camada foi utilizado o *método da garrafa de areia*, para medir o peso volúmico seco e o teor em água dos provetes colhidos fazendo-se os orifícios preferencialmente longe do eixo central da barragem por forma a não influenciar o processo de rotura. O processo é descrito na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Descrição do processo de substituição de areia. Adaptado de (Leonardo,2016).

	1- Limpar a superfície do aterro e inserir o círculo com o orifício de 10cm de diâmetro;
	2- Retirar uma amostra de solo para pesagem posterior;
	3- Nesta fase coloca-se a garrafa de areia no centro do círculo e esvazia-se o seu conteúdo até preencher o volume do orifício. Assim que se termina o orifício é fechado e a garrafa de areia é removida;
	4- A areia que preencheu o orifício e a que restou do cone da garrafa são retiradas e armazenadas; o peso da areia dentro do volume é calculado subtraindo o peso que preenche o cone da garrafa ao peso total da areia que foi retirada;
	5- O orifício é cuidadosamente re-preenchido e compactado com os mesmos instrumentos utilizados na barragem de aterro.

5.5.4 Corte final do aterro e elaboração do canal piloto

A barragem contruída por camadas é mais larga e mais alta que a barragem que se pretende ensaiar. Após o fim da construção da barragem a mesma é coberta por uma manta plástica, para reduzir as perdas de humidade. Na véspera do ensaio, a barragem é cortada por forma a impor-lhe a geometria final que se pretende ensaiar. Como se sabe, após a construção da barragem, mesmo cobrindo-a com uma manta plástica, as camadas superiores perdem alguma humidade, de modo que o corte final efetuado na véspera do ensaio, para além de impor as dimensões pretendidas serve também para remover as camadas mais superficiais, que apresentam menor teor em água.

Após a implementação das formas finais, o passo seguinte foi o talhar do canal piloto (brecha inicial) para a geometria pretendida.

Capítulo 6

Tratamento de Dados e Resultados

6.1 Introdução

Este estudo baseia-se na análise de um conjunto de resultados que foram obtidos a partir de três ensaios experimentais de rotura por galgamento de barragens de aterro.

Neste capítulo, apresentam-se os resultados da análise dos dados dos Ensaios 1, 2 e 3. No ponto 6.2 apresentam-se as estimativas do hidrograma efluente da brecha onde se justifica o problema que esteve na base da análise da relação da hidrodinâmica do escoamento com a morfologia da brecha durante a ocorrência de episódios de rotura geotécnica (ponto 6.3)

6.2 Estimativas do hidrograma efluente da brecha

Conforme referido em 3.4 o hidrograma efluente da brecha foi estimado através de dois métodos distintos: 1) balanço de massas na albufeira e 2) baseado na curva e vazão do descarregador de jusante.

Nos gráficos 6.1 a 6.4 apresentam-se as estimativas referidas, relativas aos Ensaios 1 e 2.

Os instantes 7928s e 8041s do Ensaio 1 bem como, o 2796s e 2883s do Ensaio 2, correspondem a instantes temporais nos quais ocorreram episódios de erosão geotécnica de grande dimensão. Conforme se pode observar, nenhum destes episódios de erosão geotécnica (correspondentes a alargamentos súbitos da brecha) se traduziram em aumentos imediatos do caudal efluente da brecha, contrariando a ideia subjacente ao comportamento da brecha como um descarregador (Ponto 3.1)

Neste contexto, quer-se perceber o que é que acontece efetivamente ao caudal, uma vez que se notou que nenhum dos hidrogramas era conclusivo. Assim, é esta a principal questão que se irá abordar e perceber através de uma análise feita no Ponto 6.3.

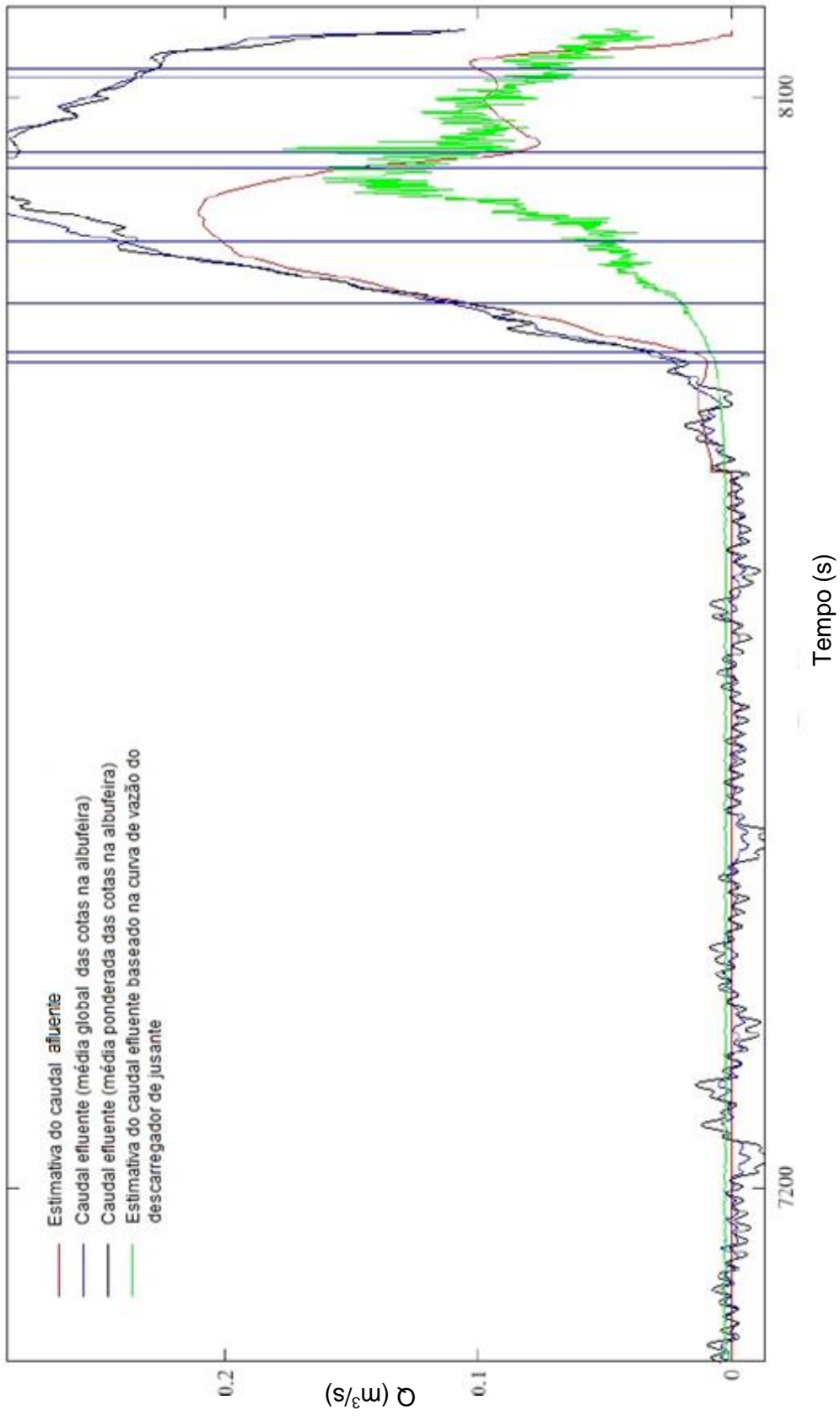


Gráfico 6.1 - Hidrograma Efluente da brecha - Ensaio 1.

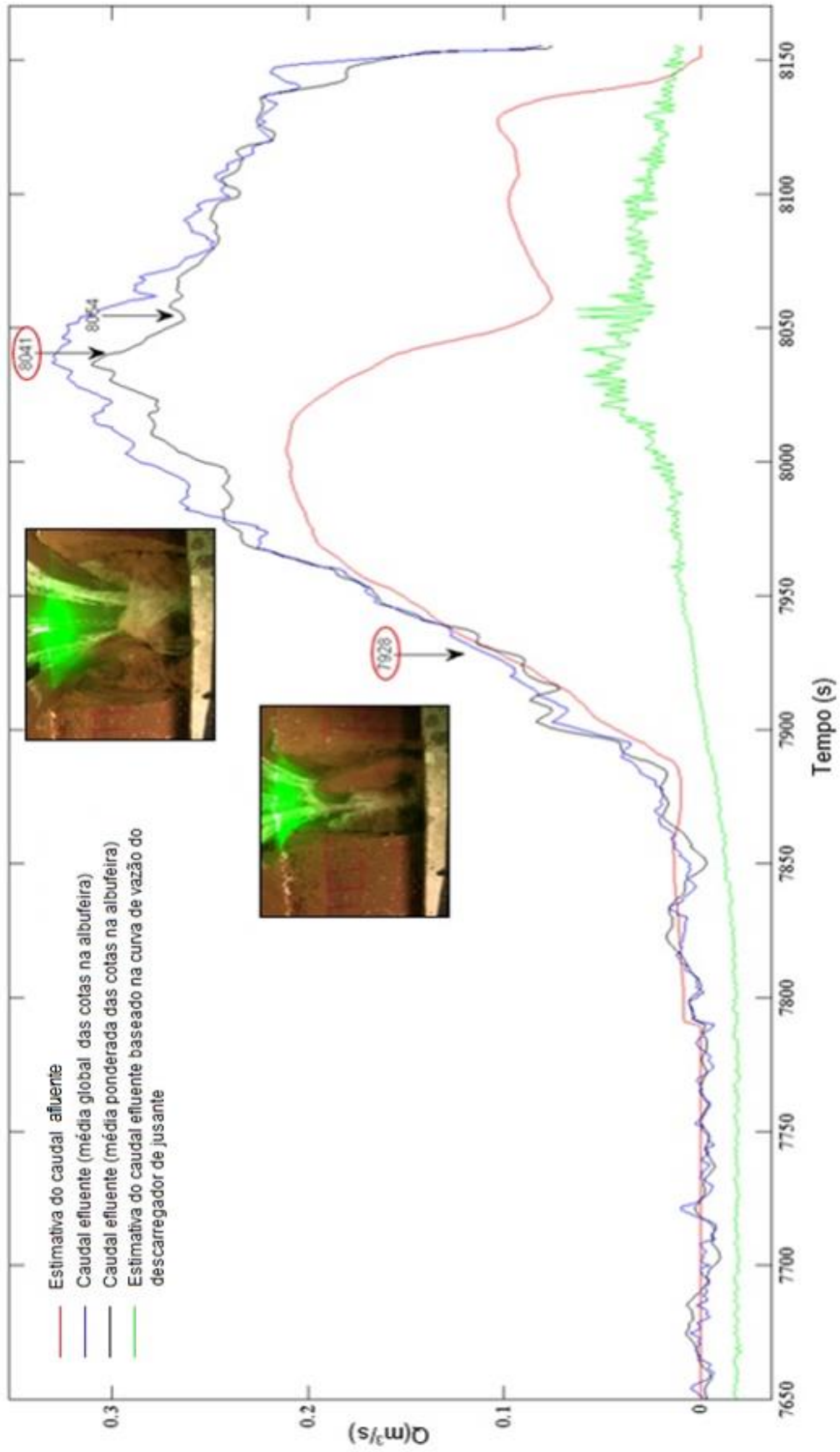


Gráfico 6.2 - Hidrograma Efluente da brecha - **Ensaio 1** para o intervalo [7650 – 8150] s com as respectivas representações da brecha após os episódios de erosão geotécnica.

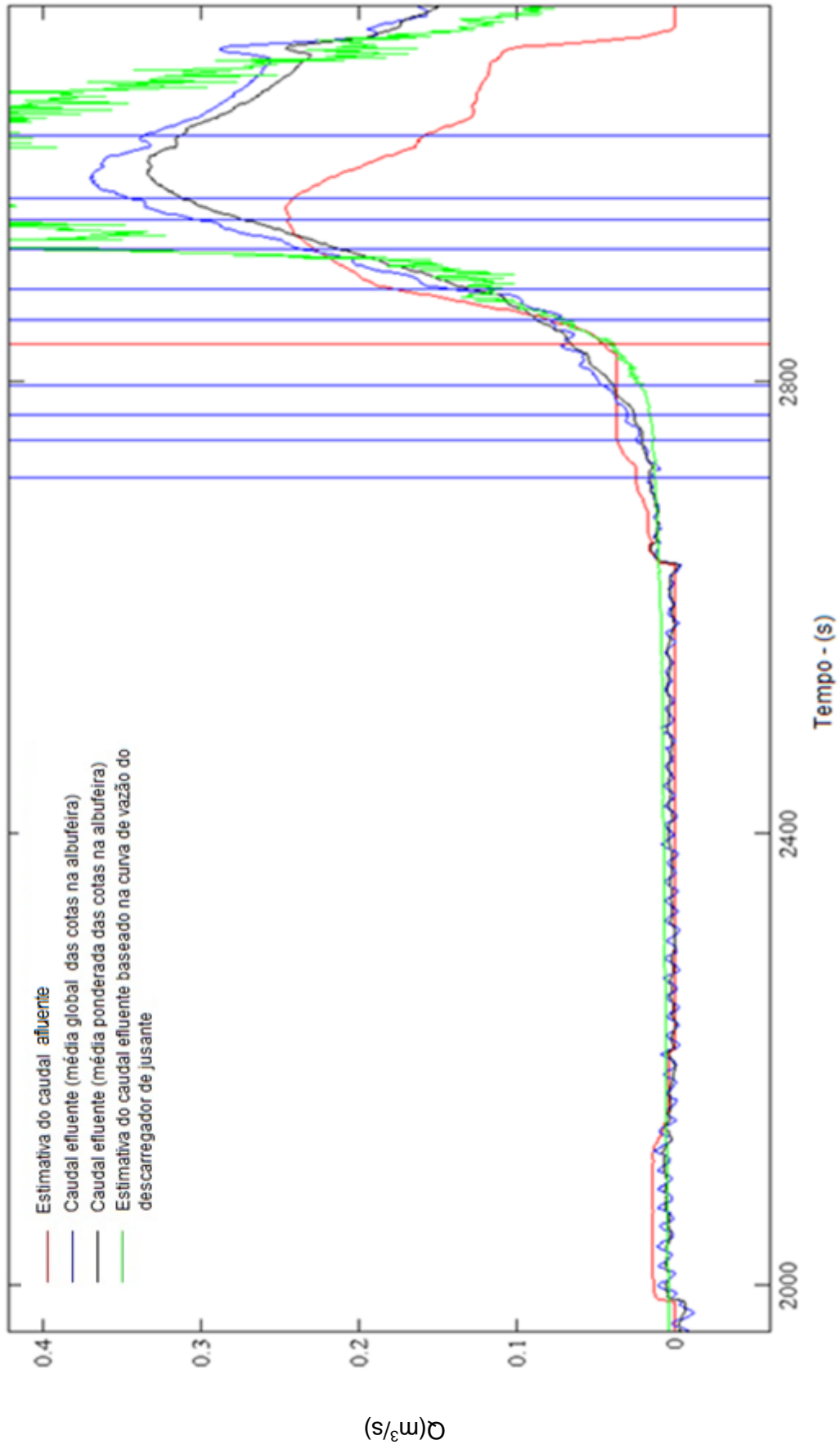


Gráfico 6.3 - Hidrograma Efluente da brecha - Ensaio 2.

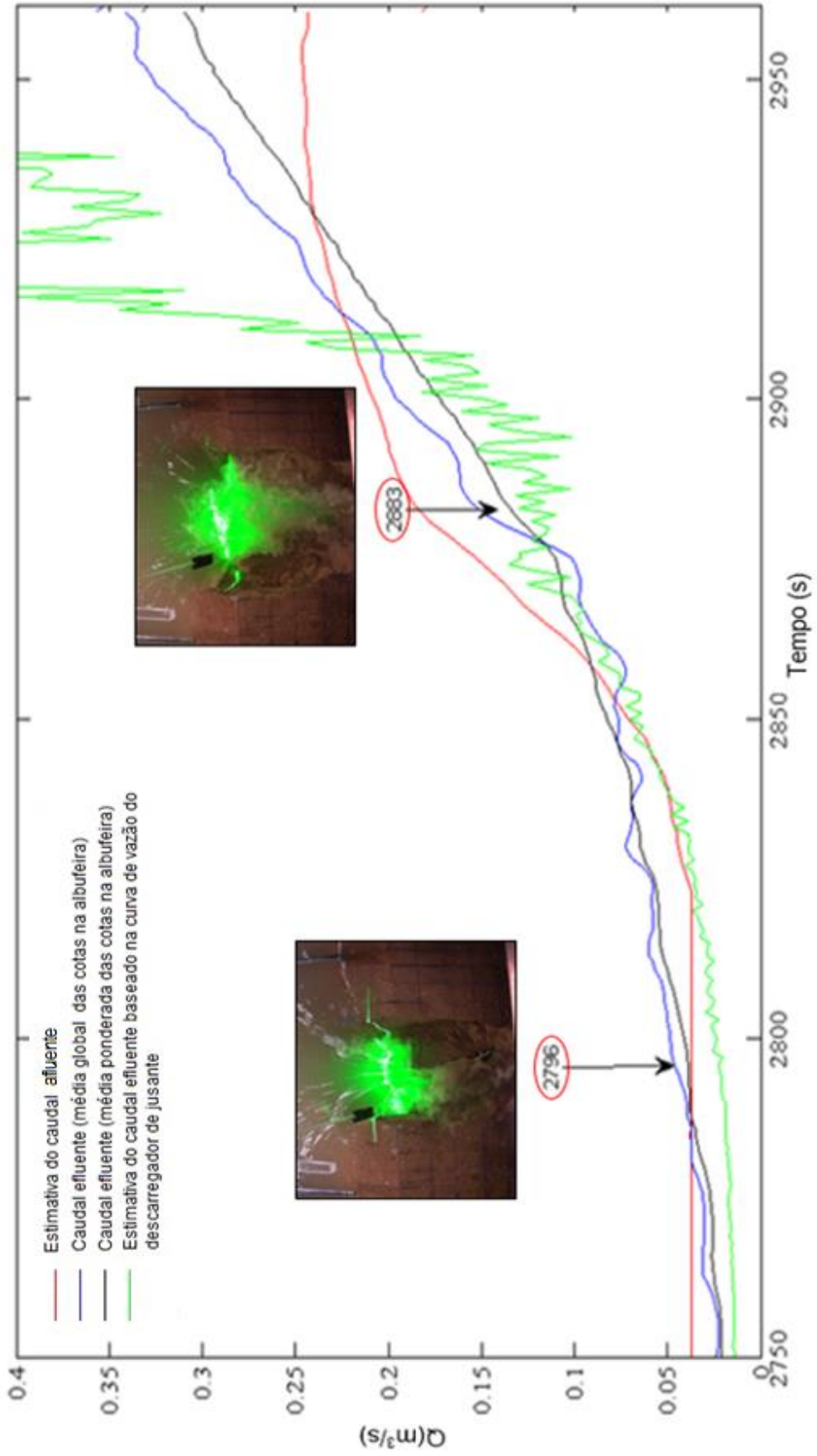


Gráfico 6.4 - Hidrograma Efluente da brecha - **Ensaio 2** para o intervalo [2750 – 2950] s com as respectivas representações da brecha após os episódios de erosão geotécnica.

6.3 Estudo da hidrodinâmica do escoamento e da morfologia da brecha

6.3.1 Particle Image Velocimetry (PIV) e Particle Tracking Velocimetry (PTV)

Particle Image Velocimetry (PIV) e o *Particle Tracking Velocimetry (PTV)* são dois métodos óticos não intrusivos para a visualização da evolução do escoamento utilizados atualmente na investigação. Embora estes sejam empregues com o mesmo objetivo, o *PTV* oferece informação mais detalhada sobre a velocidade das partículas do que o *PIV*, uma vez que o princípio básico de funcionamento do *PIV* consiste em registar a posição de partículas distribuídas no fluido em instantes de tempo próximos através de imagens que são captadas por câmaras de alta velocidade. Estas imagens que ficam armazenadas, são divididas em pequenas áreas, denominadas áreas de interrogação, que são tratadas por métodos estatísticos (correlação) para determinar o deslocamento das partículas e por conseguinte, o campo de velocidade desejado. Isto é, os resultados que são obtidos são os mais prováveis de acontecer. No *PTV* o movimento de partículas é seguido entre imagens sequenciais em que o seu utilizador define a área de interrogação que pretende estudar e ainda define os parâmetros mais adequados à mesma (Umeyama, Shintani, & Watanabe, 2010).

Neste estudo, houve uma primeira abordagem na análise do campo de velocidades no interior de um volume de controlo junto à brecha, correspondente à determinação do mapa de velocidades instantâneo do escoamento antes, durante e após a ocorrência de episódios de erosão geotécnica. Verificou-se que, os mapas de velocidade determinados desta forma permitiam ter uma ideia global do comportamento do escoamento, mas não permitem analisar com detalhe a resposta do escoamento à ocorrência destes episódios de erosão. Efetivamente, várias pesquisas recentes têm defendido que o *PIV* quando utilizado nestes casos de investigação que envolvem barragens de aterro apresenta problemas relativamente à falta de iluminação homogénea, bem como falhas nas câmaras de alta velocidade, por conseguinte, quando se analisa uma sequência de imagens em *PIV* é importante notar uma relevante limitação deste método que é a perda de dados para rastrear, que não são encontrados numa sequência de imagens na área de interrogação que foi definida (Santos, 2016). Por esta razão, decidiu-se utilizar o *PTV* para perceber a relação da hidrodinâmica do escoamento junto com a morfologia da brecha, em particular, durante os episódios de erosão geotécnica.

Na Figura 6.1 exemplifica-se a aplicação do *PTV* a duas imagens sequenciais ($dt=1/150s$) adquiridas com a câmara de alta velocidade Mikrotron.

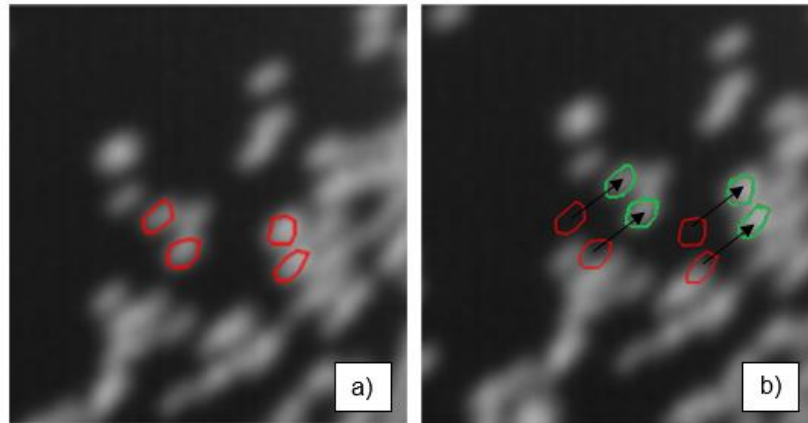


Figura 6.1 - Aplicação do *PTV* a duas imagens sequenciais ($dt=1/150s$) adquiridas com a câmara de alta velocidade Mikrotron: a) Partículas seleccionadas; b) instante da posição inicial e final das partículas.

6.3.2 Modelo conceptual do escoamento sob a brecha

Em condições designadas “normais” do escoamento que atravessa o canal piloto ocorrem diversas instabilidades geotécnicas. A observação em planta do escoamento sobre a brecha permitiu identificar duas zonas de escoamento: 1) escoamento não-separado; e 2) escoamento separado. Na zona central da brecha existe uma área de escoamento concentrado, designada por escoamento não-separado. O escoamento separado corresponde à área da brecha que não está a ser utilizada para descarga, a qual é preenchida por vórtices tridimensionais (Figura 6.2).

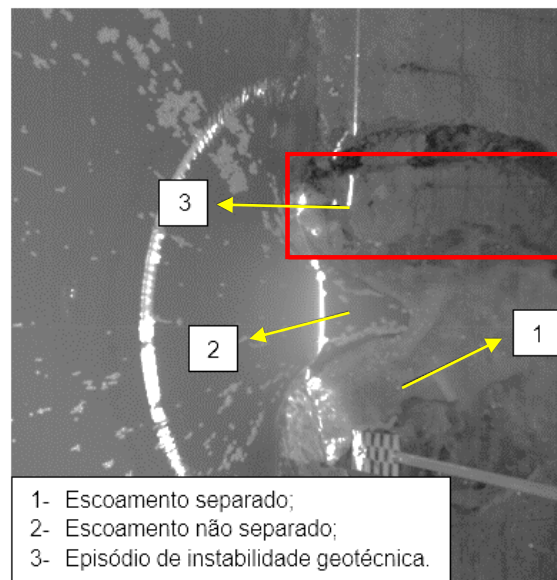


Figura 6.2 – Zonas do escoamento sob a brecha. Exemplo da ocorrência de um episódio de rotura geotécnica.

Durante o decorrer de um ensaio experimental ocorre um determinado número de eventos geotécnicos causados pela queda de material da própria barragem. Os mesmos podem ocorrer claramente no coroamento do aterro, causando o alargamento evidente da brecha ou em zonas onde a brecha também alarga, mas de forma mais subtil. A sustentar esta observação apresenta-se o modelo conceptual que foi adotado para a interpretação dos resultados da hidrodinâmica do escoamento junto da brecha. Observou-se que quando ocorre um episódio de erosão geotécnica duas situações são possíveis de ocorrer (Figura 6.3):

- 1- O campo de velocidades é afetado (quando o episódio de erosão geotécnica interjeta a secção de controlo hidráulico) – **Caso A**;
- 2- O campo de velocidades “não sente” o episódio de rotura, ou seja, o episódio de erosão geotécnica ocorre abaixo da secção de controlo hidráulico – **Caso B**.

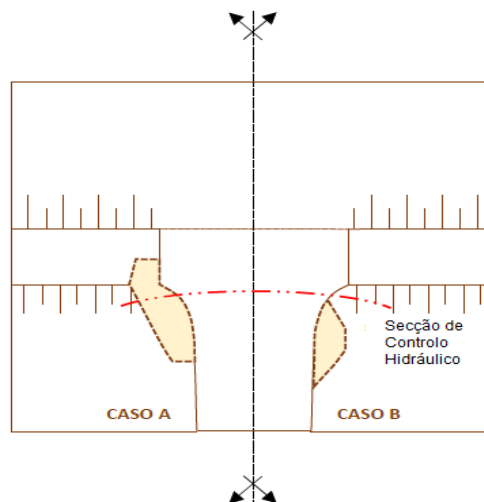


Figura 6.3 - Representação do modelo conceptual que traduz a hidrodinâmica do escoamento junto à brecha.

6.3.3 Variáveis analisadas

Por forma a compreender o comportamento do escoamento junto à brecha durante os episódios de erosão geotécnica estudados analisou-se a evolução temporal dos limites laterais esquerdo e direito do escoamento não separado junto ao plano vertical do laser (Figura 6.4), obtendo-se assim a largura do escoamento não separado.

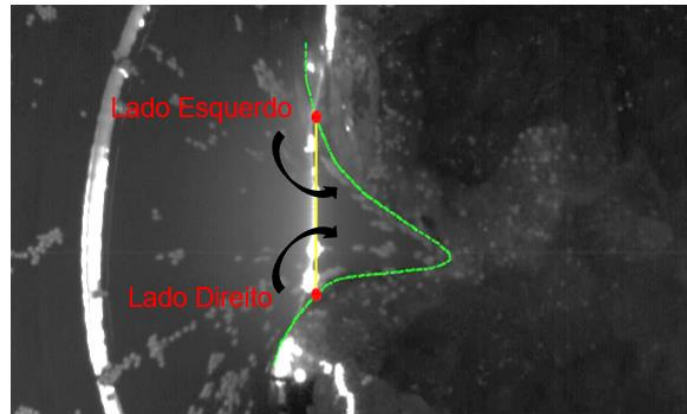


Figura 6.4 - Representação do lado esquerdo e direito de convenção para a análise do escoamento não separado.

Em paralelo, analisou-se também a evolução temporal da velocidade em pontos próximos do local de ocorrência dos episódios de erosão geotécnica, através do método de *PTV*, conforme exposto em 6.3.1 com as imagens que foram captadas pelas câmaras de alta velocidade nos intervalos de tempo seleccionados.

O estudo da relação entre a hidrodinâmica do escoamento e a morfologia da brecha foi realizado para cada um dos ensaios experimentais elaborados, especificamente para o Ensaio 1 – aterro homogéneo, com brecha triangular e Ensaio 2 – aterro homogéneo com brecha retangular. No Ensaio 1 e 2 analisaram-se respetivamente dois intervalos de tempo que englobam um determinado evento geotécnico ocorrido, note-se que o instante representativo do mesmo não corresponde ao exato momento desde o início do ensaio, mas sim ao momento em que se determina a remoção súbita da placa metálica existente na brecha. Este momento é o que define o $t=0s$, que corresponde também, ao instante em que todos os equipamentos instalados começam a trabalhar simultaneamente na aquisição de dados.

6.3.4 Ensaio 1

Como mencionado anteriormente, em cada ensaio realizado observaram-se diversos episódios de rotura geotécnica durante o processo de rotura. No entanto, considerando que a quantidade de dados adquiridos é muito extensa e que o método de *PTV* é demorado, analisaram-se apenas dois intervalos de tempo que demonstrassem relevância no Ensaio 1: [7926-7933s] e [8039-8043] s.

Intervalo temporal [7926-7933] s

O processo da queda do bloco é um fenómeno imediato que com uma câmara normal (25fps) não seria fácil de detetar. No entanto, as câmaras de alta velocidade permitiram determinar o instante exato no qual ocorreu o episódio de erosão geotécnica, o que foi determinante para os resultados obtidos.

Neste intervalo temporal o episódio de rotura geotécnica ocorre ao segundo 7928,3 do lado esquerdo da brecha (Figura 6.5a).

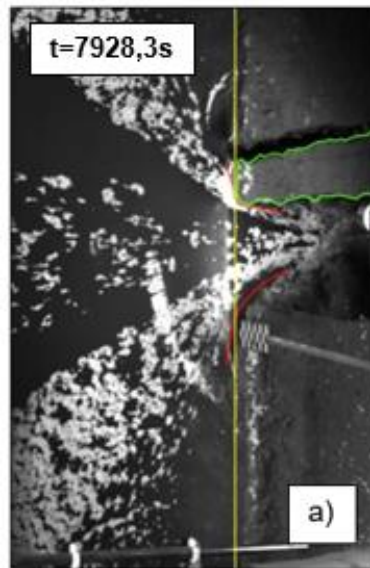


Figura 6.5 - a) Delimitação da área do bloco de solo que cai ao segundo 7928,3s.

Nos estudos que antecederam a realização deste trabalho de mestrado, a primeira análise das velocidades superficiais do escoamento junto à brecha foi efetuada por recurso a um algoritmo de PIV (software de utilização livre disponibilizado no Matlab – *PIVlab*). Ao efetuar a série temporal da velocidade em vários pontos do escoamento, por recurso ao *PIVlab*, observou-se que o método de PIV não ofereceu resposta à questão que se colocava, uma vez que a série temporal da velocidade em vários pontos adjacentes à brecha no lado em que ocorreram os episódios de erosão geotécnica, não refletiu alterações significativas, exibindo assim este método carência de precisão na sua aplicação. Esta constatação esteve na origem da determinação de séries temporais da velocidade através do método de PTV no interior de áreas de interrogação localizadas relativamente próximas do episódio de erosão geotécnica

No caso do intervalo de análise 7926 a 7933s, a área de interrogação na qual se analisou a série temporal da velocidade média espacial é a que se apresenta na Figura 6.6.

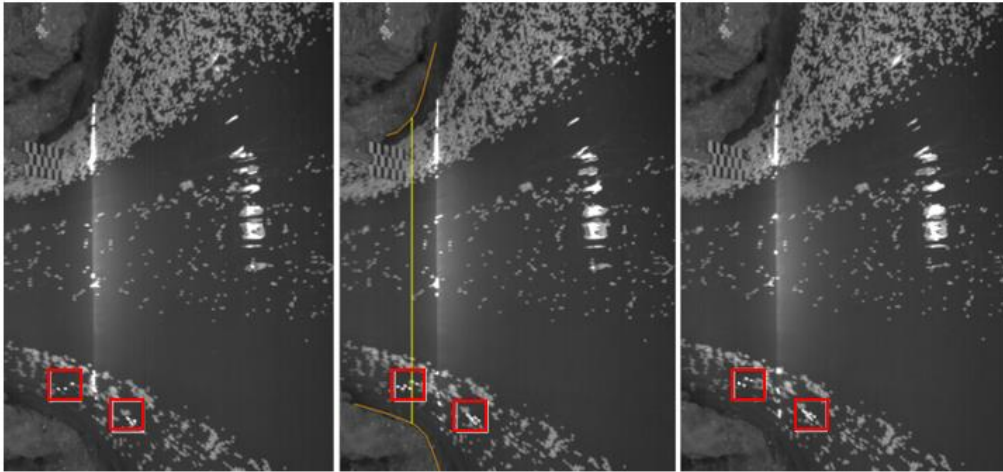


Figura 6.6 - Exemplo da representação da área de interrogação - Secção A para melhor análise das velocidades.

A série temporal da velocidade média espacial do escoamento na área de interrogação assinalada na Figura 6.6 encontra-se no Gráfico 6.5. Neste pode observar-se que o campo de velocidades sofre um ligeiro aumento no instante 7928,3s, logo após a ocorrência do episódio de erosão geotécnica. No entanto, considerando a elevada dimensão do bloco de solo que cai era presumível que a alteração na série temporal da velocidade fosse mais notória que o observado.

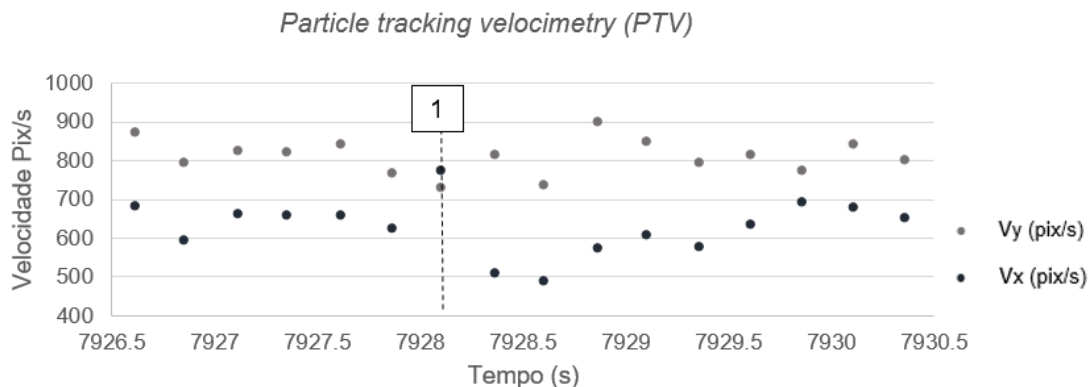


Gráfico 6.5 - Variação da velocidade em Pix/s das partículas de poliestireno durante o intervalo definido. Ponto 1 – Instante onde se processa a queda do bloco do aterro (t=7928,3s).

Para perceber como se comporta o escoamento sobre a brecha antes, durante e após a ocorrência de um episódio de erosão geotécnica procedeu-se à análise da evolução temporal dos limites laterais esquerdo e direito do “escoamento não-separado” junto ao plano vertical do laser.

A queda do bloco que se dá no intervalo de tempo em análise ocorre ao instante 7928,3 segundos após o início do Ensaio 1, no lado esquerdo do coroamento (Figura 6.7 – b)).

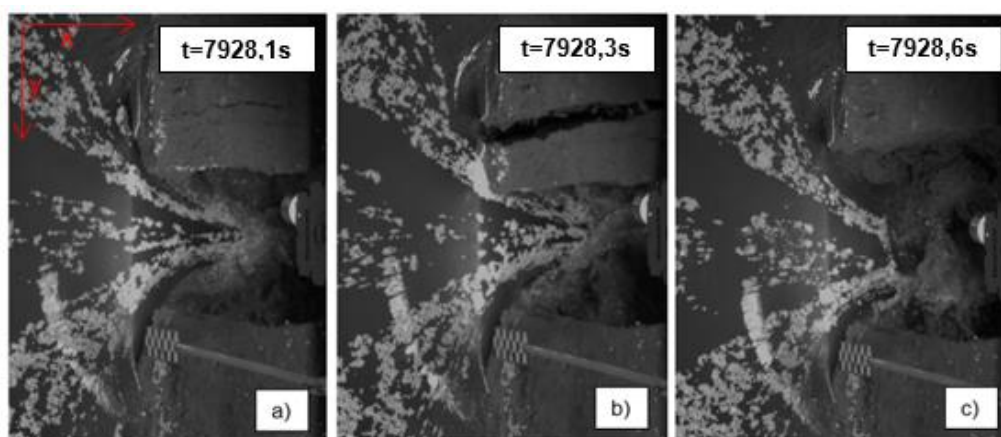


Figura 6.7 - a) instante $t=7928,1$ antes da queda do bloco de aterro; b) instante da queda $t= 7928,3$; c) morfologia final da brecha do aterro após o episódio de erosão geotécnica no instante $t=7928,6s$.

Esta ocorrência provoca uma larga variação no eixo dos YY no escoamento que incita a um aumento notável na largura da brecha do aterro realizado, como é notório pelo Ponto 1 assinalado no Gráfico 6.6. Com o tempo é possível observar que este aumento vai progredindo de uma forma mais suave e mais ou menos constante, mostrando que a longo termo, o caudal efluente da brecha acaba por aumentar devido à ocorrência do episódio de erosão geotécnica ocorrido no instante 7928,3s.

Na Tabela 6.1 apresentam-se as coordenadas exatas do instante antes e após a queda do bloco bem como a largura do escoamento não separado entre os limites laterais definidos quando intercetados com o plano vertical do laser.

Tabela 6.1 - Resultados da análise da distância entre o limite lateral esquerdo e direito após o episódio de erosão geotécnica para o intervalo [7928,1s-7928,6s].

Figura 6.7	$t_{\text{hidrograma}}$ (s)	Largura do ENS (pix)
a)	7928,1	362,4
b)	7928,3	305,3
c)	7928,6	427,3

Conclui-se assim que tanto o campo de velocidades local como a largura do escoamento não-separado são afetados pelo episódio de erosão geotécnica ocorrido ao instante 7928,3s, correspondendo à situação do modelo conceptual em que o bloco de solo que cai do aterro tem impacto na hidrodinâmica do escoamento, acabando por se repercutir no aumento do caudal efluente da brecha - **Caso A** do modelo conceptual.

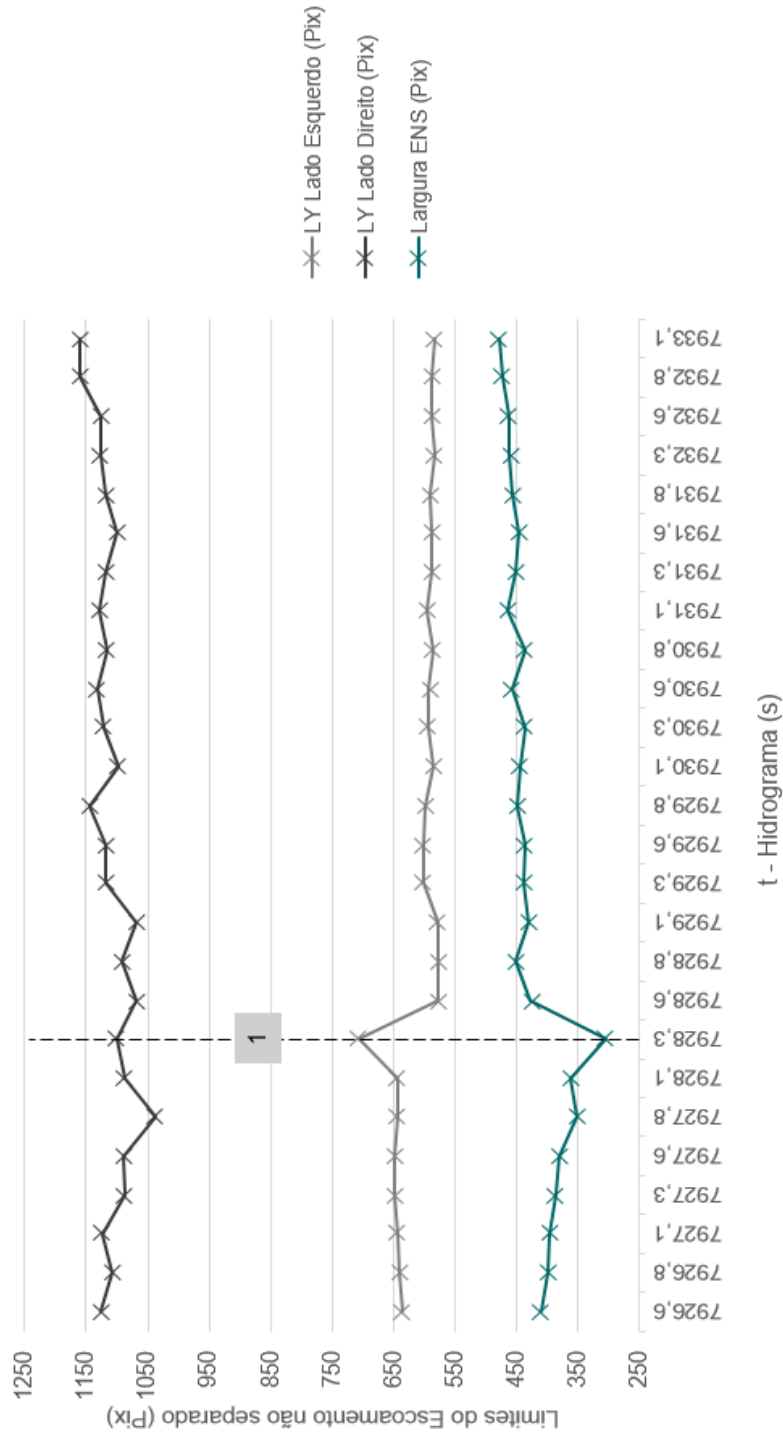


Gráfico 6.6 - Representação gráfica da variação dos limites esquerdo/direito e da largura do escoamento não separado no intervalo [7926,6- 7933,1] segundos. **Ponto 1** – Instante do episódio de erosão geotécnica.

Intervalo temporal [8039-8043] s

No intervalo [8039s-8043s] do Ensaio 1 verifica-se a ocorrência de um episódio de erosão geotécnica do lado direito da brecha ao segundo 8041,2s.

A análise do campo de velocidades foi mais uma vez efetuada por recurso ao *PTV* numa área de interrogação de 64x64 pixéis localizada relativamente próxima do sítio de ocorrência do episódio de erosão geotécnica.

A série temporal das componentes x e y da velocidade no intervalo de tempo analisado consta do Gráfico 6.7. Observa-se que, embora as componentes x e y da velocidade (v_x e v_y , respetivamente) apresentem ligeiras variações ao longo do intervalo, estas não aparentam ser originadas pelo episódio de erosão geotécnica deste intervalo. Na realidade, no final do intervalo, as componentes v_x e v_y da velocidade convergem aproximadamente para os valores que apresentavam antes da queda do bloco. Isto é, em termos de velocidade não se nota qualquer alteração que pudesse representar um aumento local de caudal.

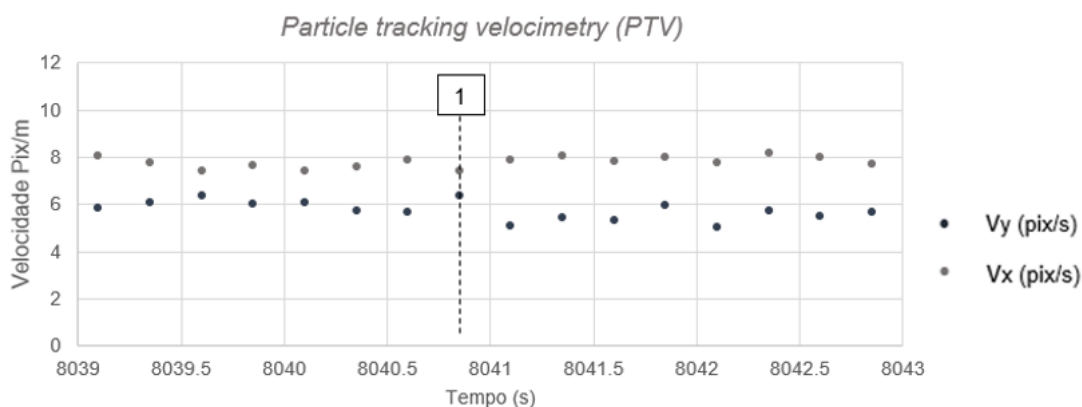


Gráfico 6.7 - Variação da velocidade em Pix/s das partículas de poliestireno durante o intervalo definido. Ponto 1 – Instante onde se processa a queda do bloco do aterro ($t=8041,22s$).

No Gráfico 6.8 apresenta-se a largura do escoamento não-separado (ENS). Neste observa-se um aumento instantâneo da largura do ENS quando bloco de solo se destaca ao segundo 8041,2. Isto acontece porque o limite direito do escoamento não-separado tenta ocupar a área que será disponibilizada para escoamento aquando da queda do bloco. Após a queda do bloco o mesmo aumenta instantaneamente, portanto, sente a queda, mas logo depois tem uma diminuição crescente para um valor inferior ao que se verificou inicialmente acabando por ter um aumento ligeiro logo a seguir, provavelmente causado pela queda de um pequeno bloco de solo.

Ou seja, o escoamento junto à brecha notou a queda do bloco do lado direito, mas este episódio de erosão geotécnica não teve um forte potencial para causar impacto no caudal que se escoava Figura 6.8.

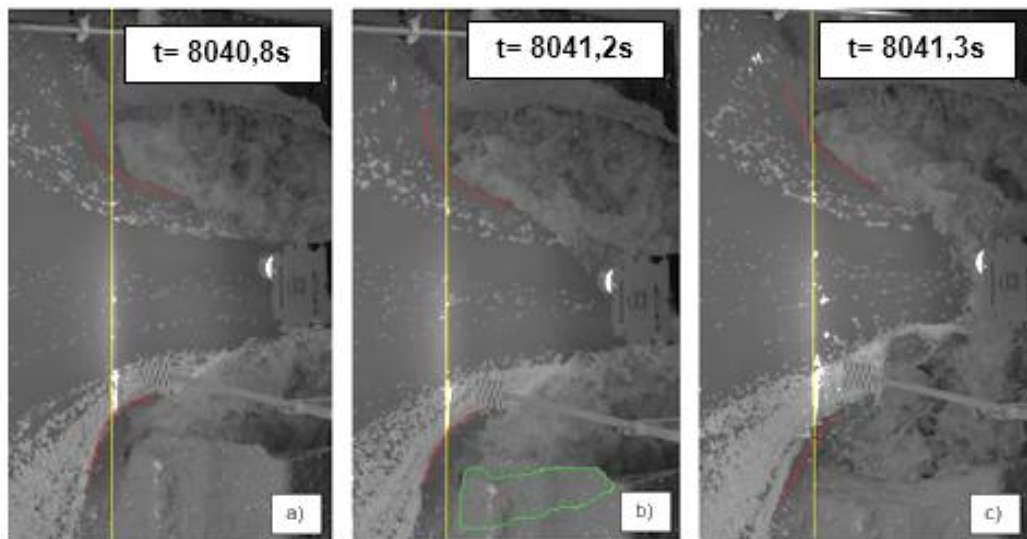


Figura 6.8 - a) instante $t=8040,8s$ antes da queda do bloco de aterro; b) instante da queda $t= 8041,2s$; c) morfologia final da brecha do aterro após o episódio de erosão geotécnica no instante $t=8041,3s$.

Na Tabela 6.2 apresentam-se as coordenadas exatas do instante antes e após o evento geotécnico, bem como a distância entre os limites laterais definidos quando interceptados com o plano vertical do laser.

Tabela 6.2 - Resultados da análise da distância entre o limite lateral esquerdo e direito após o episódio de erosão geotécnica para o intervalo [8040,8s-8041,3s].

Figura 6.8	$t_{\text{hidrograma}}$ (s)	Largura do ENS (Pix)
a)	8040,8	605,0
b)	8041,2	623,3
c)	8041,3	672,8

Para este episódio de rotura geotécnica observa-se que, embora o campo de velocidades e a largura do ENS sejam afetados localmente, o mesmo não se repercutiu num aumento de caudal. Ao longo do tempo observa-se uma convergência para os valores iniciais, de modo que não estamos perante o **Caso B** do modelo conceptual.

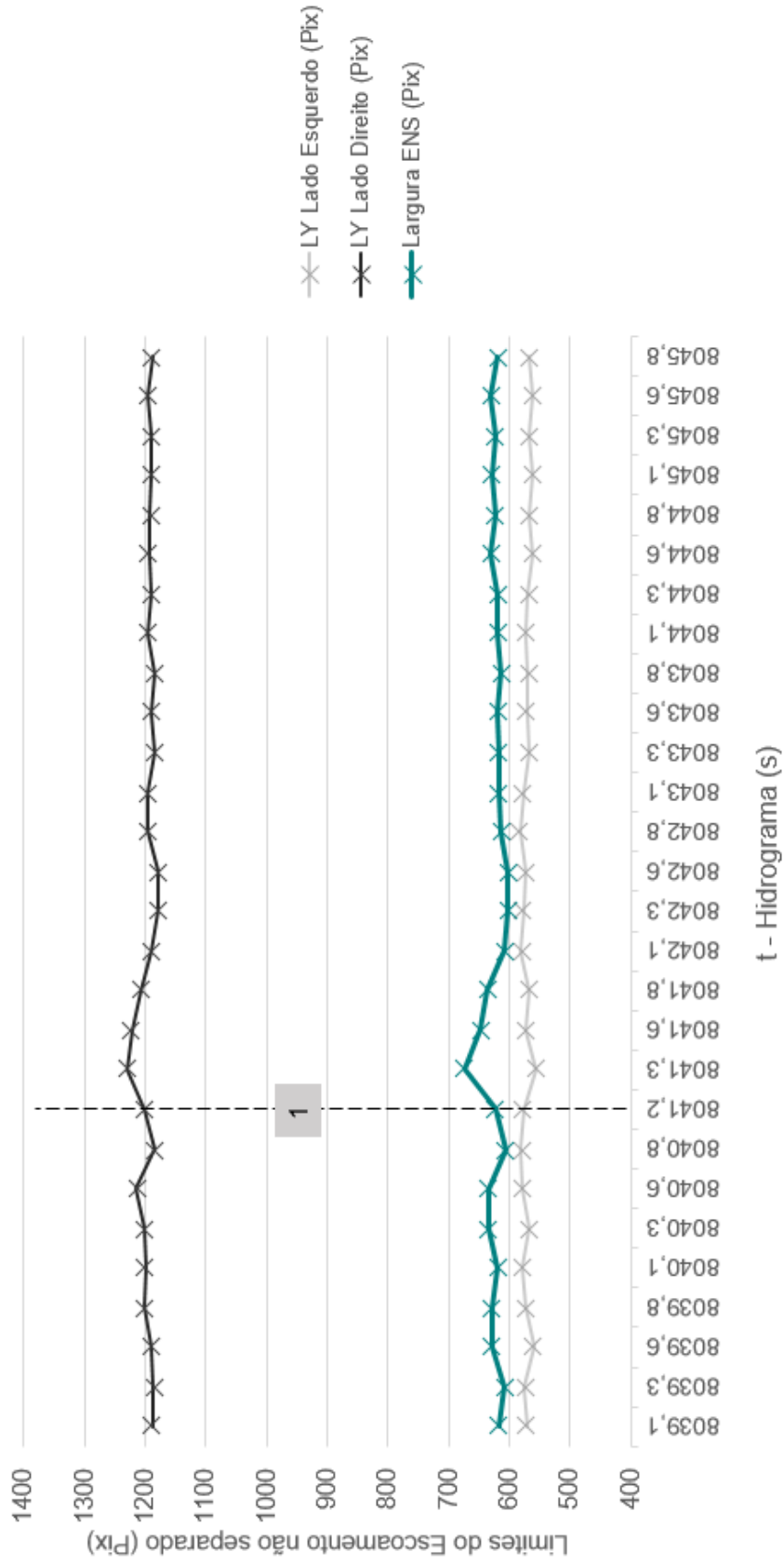


Gráfico 6.8 - Representação gráfica da variação dos limites esquerdo/direito e da largura do escoamento não separado no intervalo [8039,1- 8045,8] segundos. **Ponto 1** – Instante do episódio de erosão geotécnica.

6.3.5 Ensaio 2

No Ensaio 2 determinaram-se as séries temporais da velocidade em áreas de interesse nos intervalos de tempo [2881-2884] e [2795-2799] s assim como se avaliou a variação temporal da largura do ENS ao longo do tempo. Cada um destes intervalos comportou um episódio de rotura geotécnica.

Intervalo temporal [2881-2884] s

Para o Ensaio 2 foi escolhido, como anteriormente, um intervalo de tempo que incluísse um episódio de erosão geotécnica com interesse de análise. O intervalo escolhido foi [2881,7-2884,4] s. Durante este intervalo temporal verifica-se o destacamento de um bloco de solo do lado direito da brecha que ocorre exatamente ao segundo 2883,6 (Figura 6.9). Este bloco é de dimensão considerável e aumenta a área disponível para escoamento na secção da brecha, sendo expectável que o mesmo se repercuta no aumento caudal escoado.

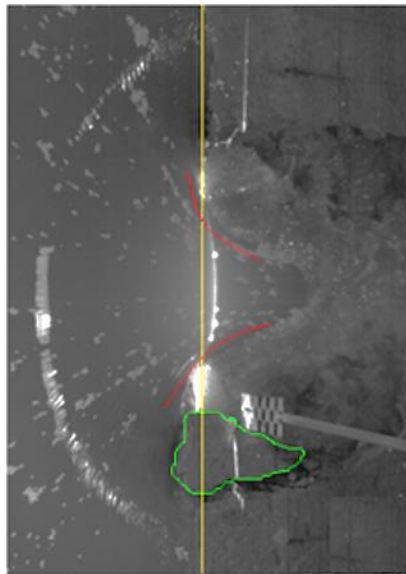


Figura 6.9 - Delimitação da área do bloco de solo que cai ao segundo 2883,6s.

A série temporal da velocidade foi determinada através do método do PTV numa área de interrogação de 64x64 pixéis localizada relativamente próxima do local de ocorrência do episódio de erosão geotécnica.

A série temporal da velocidade é apresentada no Gráfico 6.9 onde se apresentam as componentes x e y da velocidade durante o intervalo de tempo em análise. Neste gráfico é possível observar que as mesmas demonstram alterações, precisamente após a queda do bloco notando-se um ligeiro aumento na componente y e uma diminuição na componente x, verificando-se posteriormente que ambas regressam aos valores iniciais.

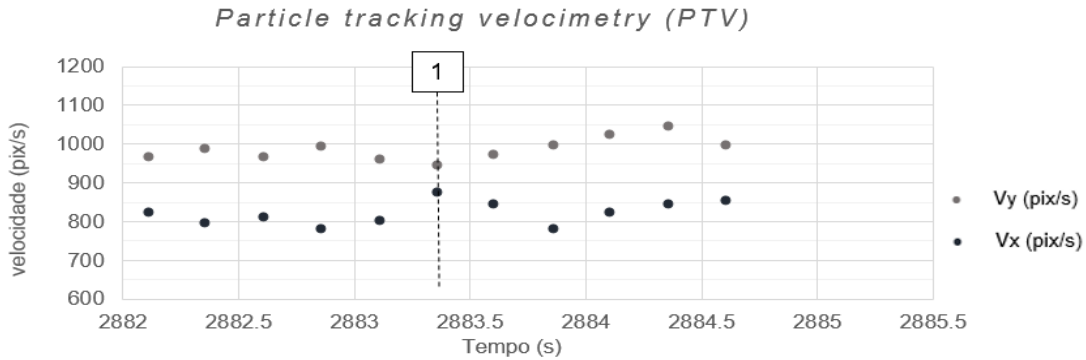


Gráfico 6.9 - Variação da velocidade em Pix/s das partículas de poliestireno durante o intervalo definido. Ponto 1 - Instante onde se processa a queda do bloco de aterro (t=2883,36s).

Os resultados da análise da hidrodinâmica do escoamento após o episódio de erosão geotécnica são apresentados no Gráfico 6.10. Neste, observa-se um aumento súbito na largura do ENS logo a seguir à queda do mesmo, isto é, entre os segundos 2883,3 e 2883,6. Posteriormente o escoamento não-separado acaba por convergir para a largura que apresentava antes da queda.

Na Tabela 6.3 apresentam-se as coordenadas exatas do instante antes e após o evento geotécnico, bem como a distância entre os limites laterais definidos quando intercetados com o plano vertical do laser.

Tabela 6.3 - Resultados da análise da distância entre o limite lateral esquerdo e direito após o episódio de erosão geotécnico. Resultados da análise da distância entre o limite lateral esquerdo e direito após o episódio de erosão geotécnica. Intervalo [2881.7-2884] s.

Figura 6.10	t hidrograma (s)	Largura do ENS (Pix)
a)	2882,9	282,4
b)	2883,3	271,2
c)	2883,6	315,5

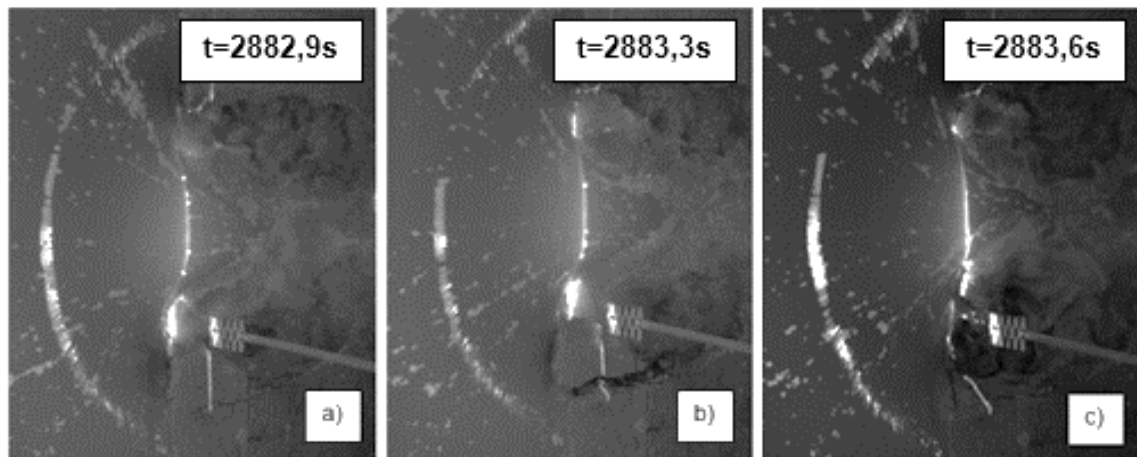


Figura 6.10 - a) instante $t= 2882,9$ antes da queda do bloco de aterro; b) instante da queda $t=2883,3$; c) morfologia final da brecha do aterro após o episódio de erosão geotécnica no instante $t=2883,6s$.

Em suma, a velocidade do escoamento e a largura do ENS são ambas localmente afetadas. Conclui-se que o episódio de erosão geotécnica aqui apresentado corresponde à situação do modelo conceptual em que a ocorrência de um episódio de erosão geotécnica não se repercute num aumento de caudal, portanto, não tem impacto no caudal efluente da brecha - **Caso A** do modelo conceptual.

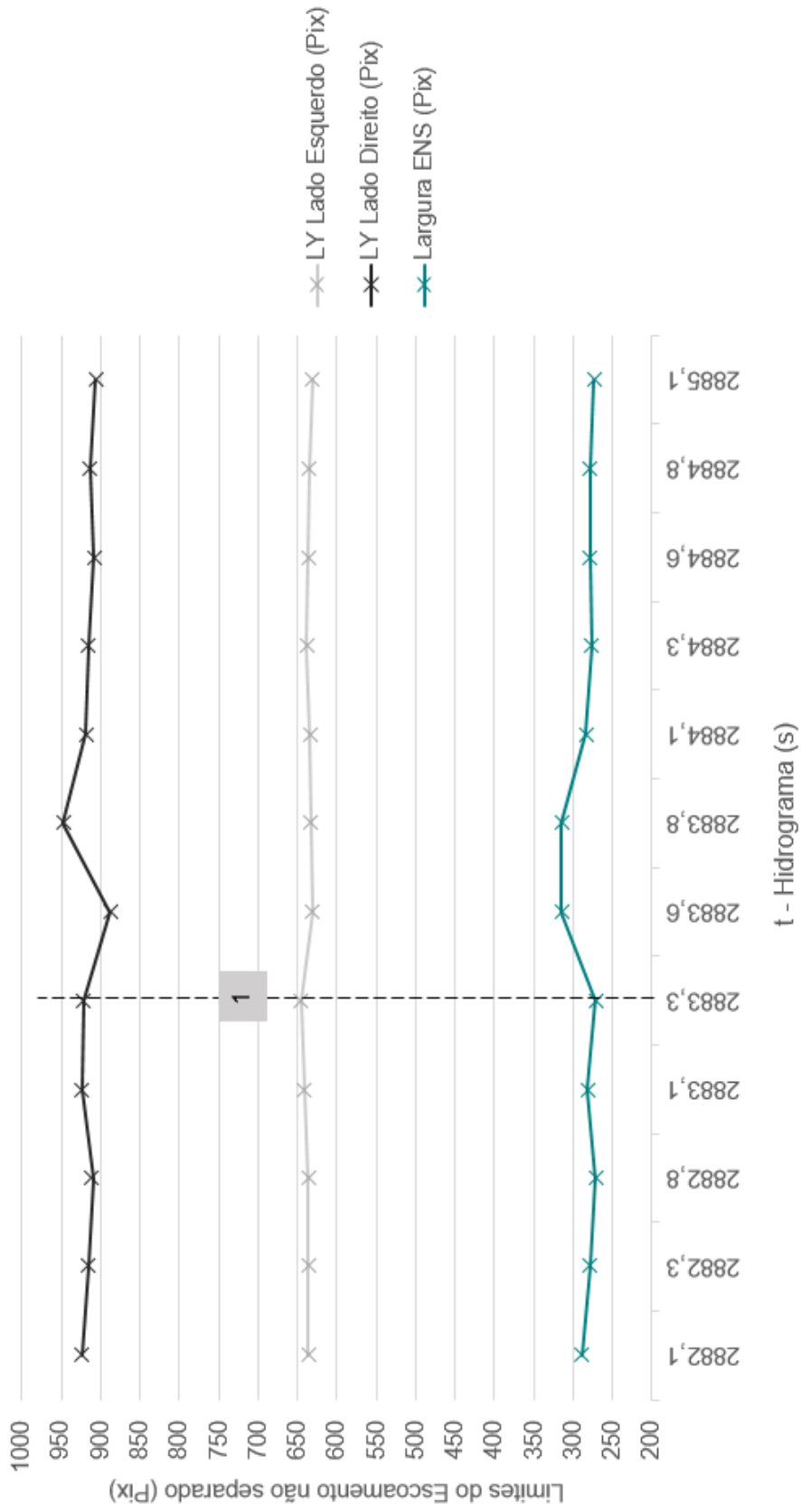


Gráfico 6.10 - Representação gráfica da variação dos limites esquerdo/direito e da largura do escoamento não separado no intervalo [2882,1-2885,1] segundos. **Ponto 1** – Instante do episódio de erosão geotécnica.

Intervalo temporal [2795 – 2799] s

Durante este intervalo verifica-se o destacamento de um bloco de solo do lado esquerdo da brecha, por volta do início do segundo 2796,6. O bloco de solo que se destaca da margem esquerda da brecha encontra-se representado na Figura 6.11. Refira-se também que, embora este bloco seja de grande dimensão, tem um impacto pequeno em termos de aumento da área disponível para escoamento na secção da brecha, sendo expectável que o mesmo não se repercuta grandemente em termos de aumento significativo do caudal escoado.

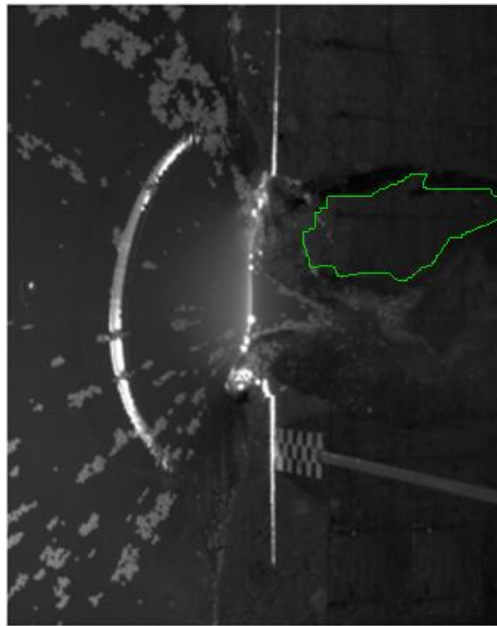


Figura 6.11- Delimitação da área do bloco de solo que cai ao segundo 2796,6s.

Para a análise do campo de velocidades deste intervalo, mais uma vez aplicou-se o método de PTV a uma área de interrogação selecionada relativamente próxima da massa de aterro que sofre a queda durante a passagem do escoamento. Observa-se que, embora as componentes x e y da velocidade (v_x e v_y , respetivamente) apresentem variações ao longo do intervalo, estas são reduzidas e não parecem ser originadas pelo episódio de erosão geotécnica deste intervalo. Efetivamente, no final do intervalo, as componentes v_x e v_y da velocidade convergem aproximadamente para os valores que apresentavam antes da queda do bloco. Ou seja, não houve qualquer aumento que pudesse representar um aumento local de caudal (Gráfico 6.11).

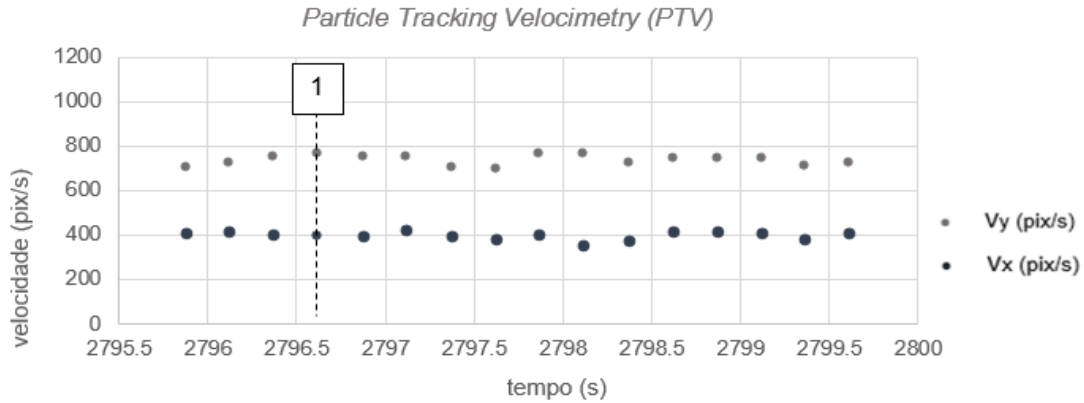


Gráfico 6.11 - Variação da velocidade em Pix/s das partículas na direção X e direção Y na área de interrogação definida. Ponto 1 - Instante onde se processa a queda do bloco de terra t=2796,6s.

Observa-se pelo Gráfico 6.12 que a largura do escoamento não separado (ENS) começa logo a aumentar assim que o bloco de solo começa a “querer” destacar-se. Isto acontece porque o limite esquerdo do escoamento não separado tenta ocupar a área que será disponibilizada para escoamento aquando da queda do bloco. Após a queda do bloco o mesmo aumenta instantaneamente, portanto, sente a queda, mas logo depois diminui para um valor inferior ao inicial acabando por estabilizar perto do valor inicial de largura do ENS (prévia à queda). Ou seja, o escoamento junto à brecha foi sensível à queda do bloco do lado esquerdo, mas este episódio de erosão geotécnica não tem potencial para causar impacto no caudal escoado.

Tabela 6.4 - Resultados da análise da distância entre o limite lateral esquerdo e direito após o episódio de erosão geotécnica. Intervalo [2795-2799] s.

Figura 6.12	t hidrograma (s)	Largura do ENS (Pix)
a)	2796,3	142,0
b)	2796,6	160,0
c)	2796,8	162,0

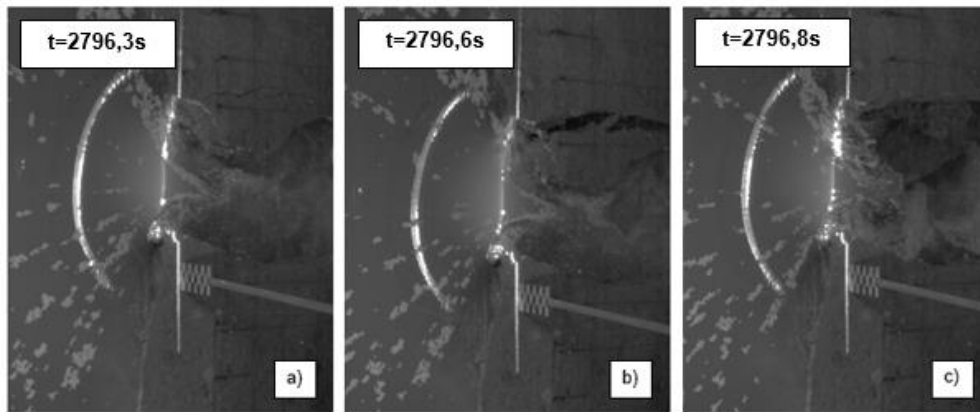


Figura 6.12 - Representação dos instantes do episódio de erosão geotécnica do intervalo [2795-2799] s do Ensaio 2.

Em resumo, a velocidade e largura do escoamento não foram muito afetados, concluindo-se então que o episódio de erosão geotécnica aqui apresentado corresponde à situação do modelo conceptual em que o episódio de erosão geotécnica não tem impacto no caudal efluente da brecha - **Caso B** do modelo conceptual.

Por forma a tentar compreender o que se processa a longo prazo nos limites do escoamento não separado e largura do mesmo, para este último intervalo decidiu-se prolongar a análise das séries temporais. Portanto, pelo Gráfico 6.13 é possível averiguar qual o comportamento das variáveis acima descritas, muito tempo após o episódio de erosão geotécnica.

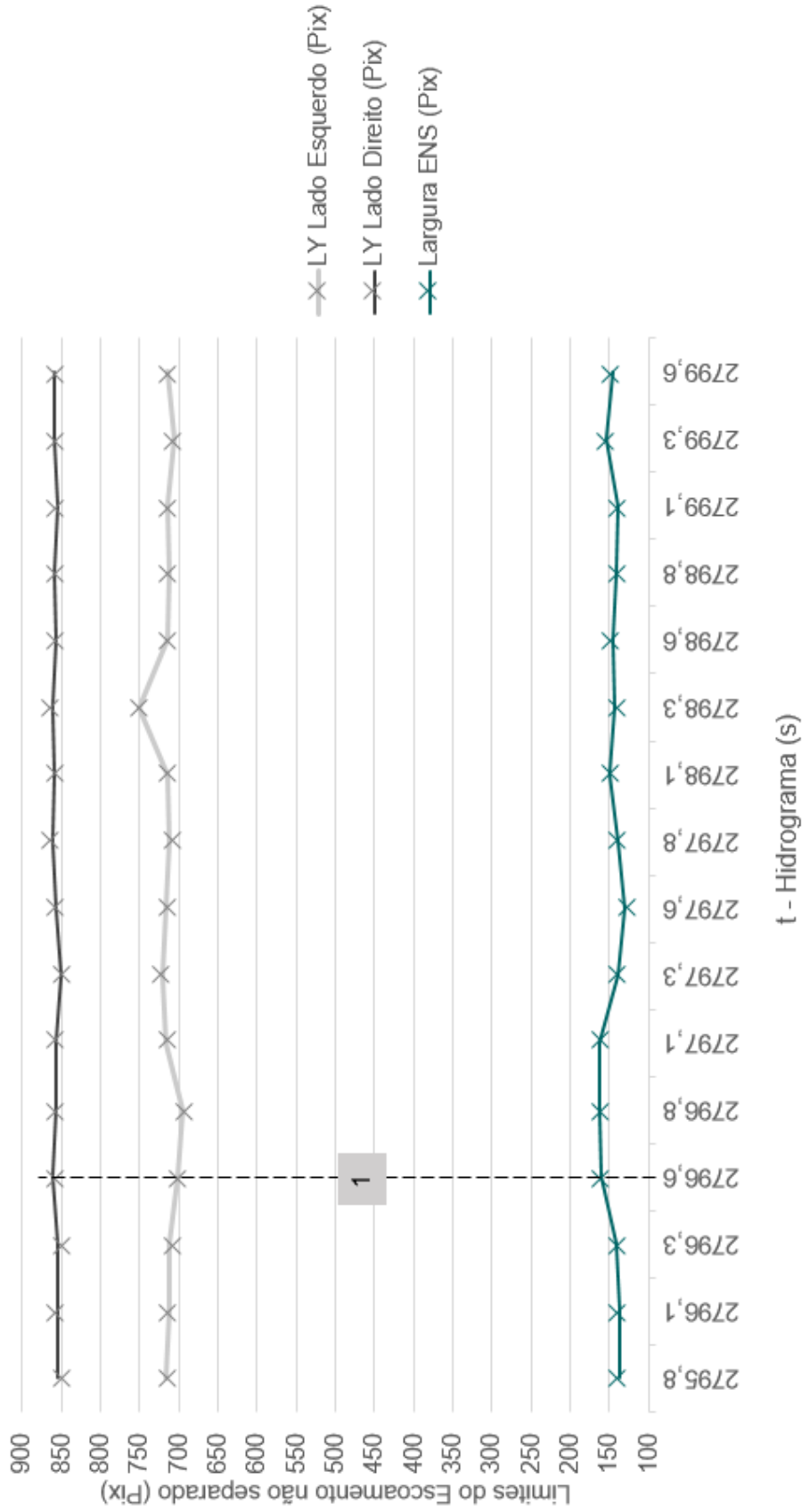


Gráfico 6.12 - Representação gráfica da variação dos limites esquerdo/direito e da largura do escoamento não separado no intervalo [2795,8- 2799,6] segundos. **Ponto 1** – Instante do episódio de erosão geotécnica.

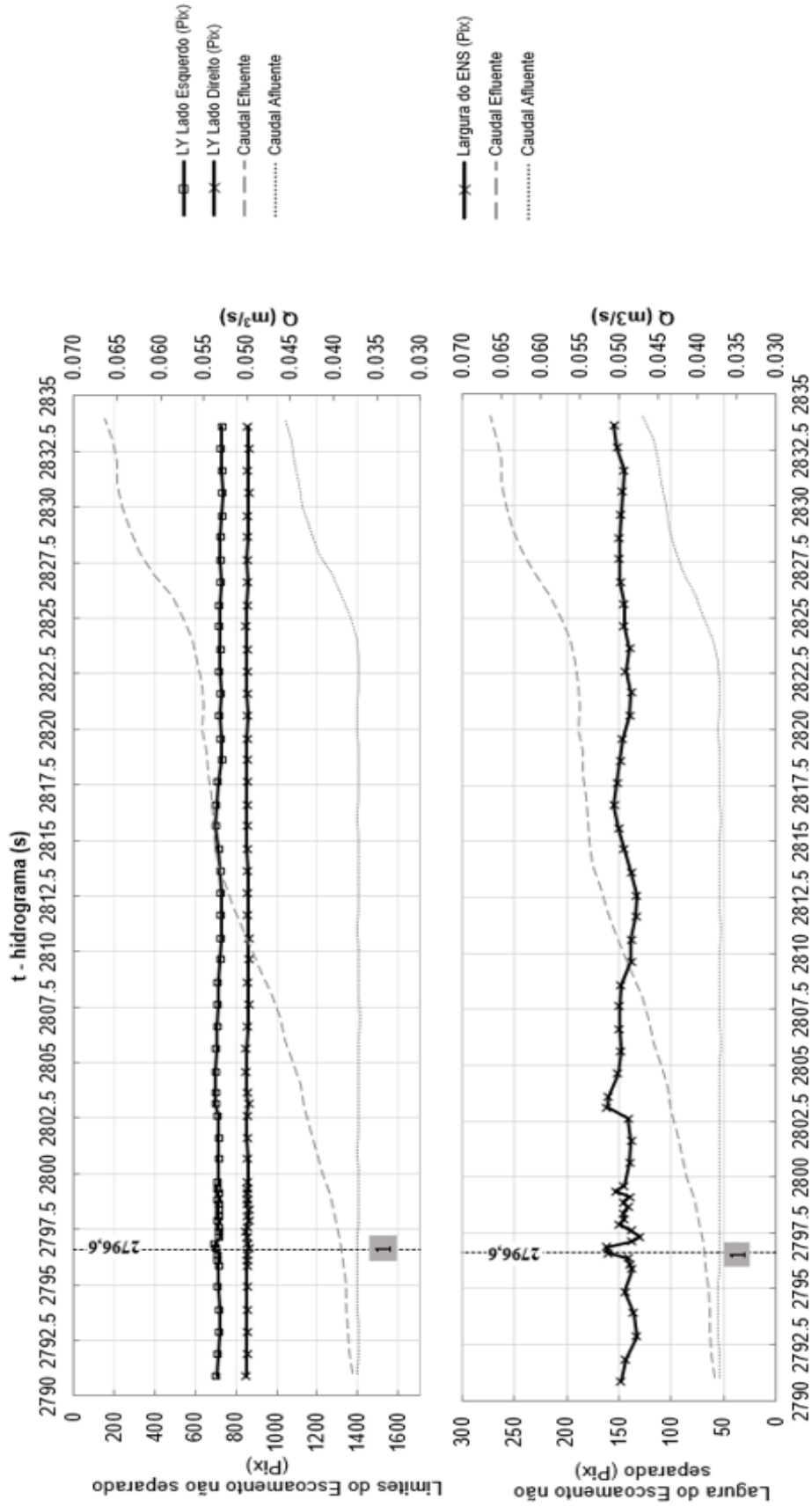


Gráfico 6.13 - Variação a longo prazo da largura do escoamento não separado e dos limites esquerdo e direito para o intervalo em estudo [2795-2799] s bem como do caudal efluente e afluente do Ensaio 2.

6.4 Evolução Temporal da Brecha de Rotura – Kinect Sensor

Pela Figura 6.13 observa-se a evolução morfológica da brecha de rotura do ensaio experimental realizado, imagens estas captadas com auxílio de *Kinect Sensor*. As mesmas apresentam a forma da brecha antes e depois do último episódio de erosão geotécnica ocorrido no ensaio.

As conclusões baseadas no campo de velocidades determinado através do método de *PTV* assentaram num modelo conceptual idealizado da morfologia da brecha, como se observa pela Figura 6.14a). O levantamento da brecha com o *KINECT* veio revelar também que a morfologia idealizada inicialmente vai de encontro às formas reais da brecha durante o processo de rotura - Figura 6.14b).

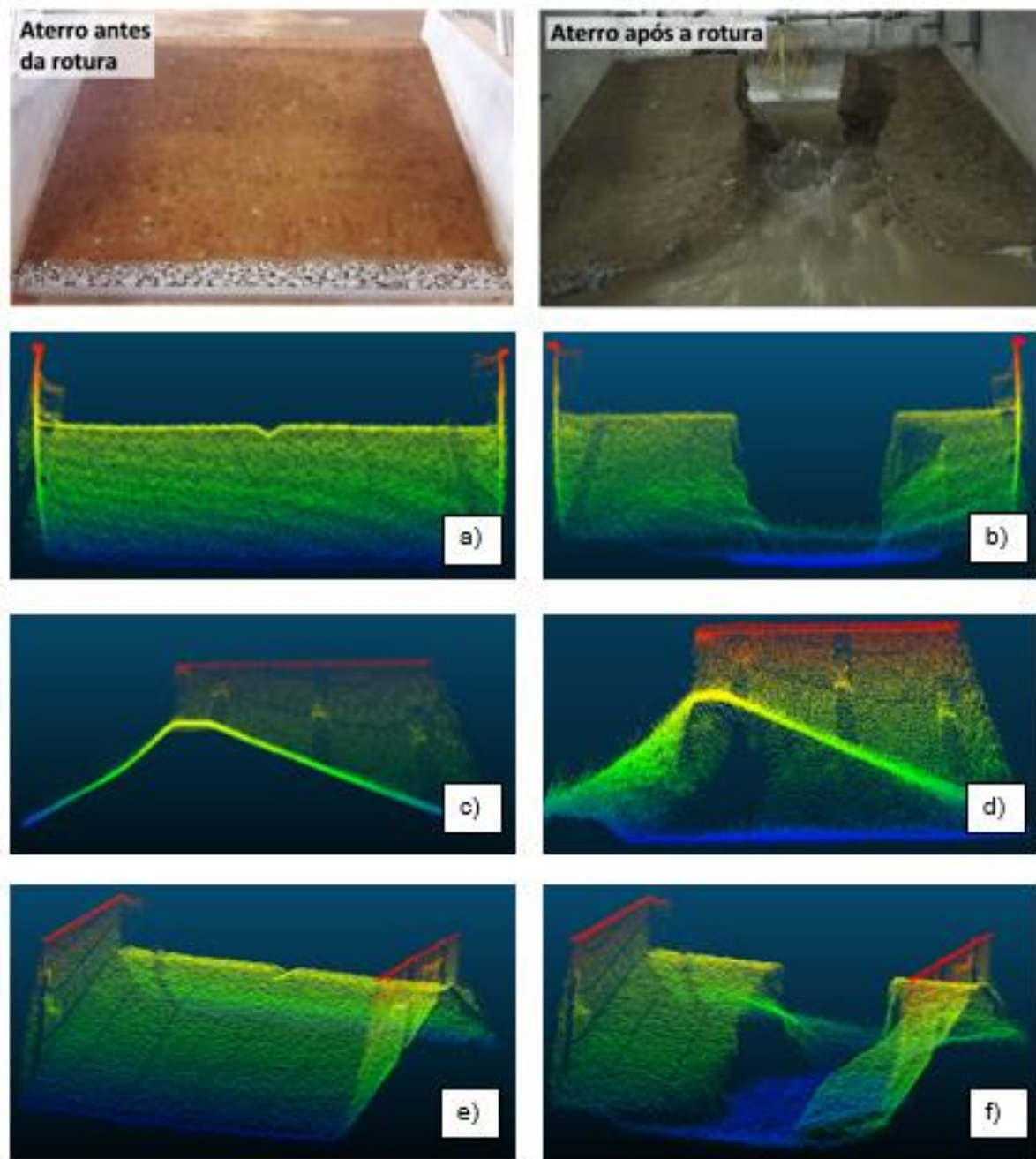


Figura 6.13 - Evolução Morfológica da brecha de rotura: a) Vista frontal antes do início do ensaio experimental; b) vista frontal após o último episódio de erosão geotécnica; c) Corte do aterro antes da rotura; d) Corte do aterro após o último episódio de rotura; e) Perspetiva antes do ensaio de rotura; f) Perspetiva final da barragem de aterro – fim do ensaio.

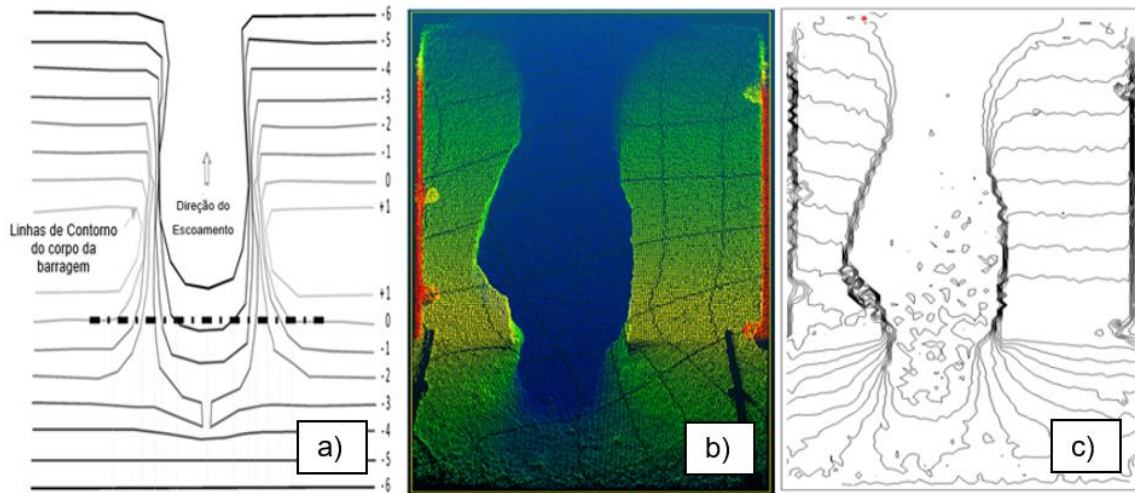


Figura 6.14 – Planta da Evolução da Brecha de rotura. a) Morfologia idealizada; b) Morfologia medida com o Kinect Sensor, c) Dados do Kinect na forma de mapas de contornos.

Capítulo 7

Conclusões

Os resultados analisados no Capítulo 6 permitiram concluir que um alargamento repentino da brecha devido a um episódio de erosão geotécnica não implica necessariamente um aumento do caudal efluente da brecha. Este facto, vem contrariar o que é adotado nos modelos numéricos de simulação deste tipo de ocorrências, de que a aumentos de área da brecha (área disponível para escoamento) terão necessariamente que corresponder aumentos de caudal. Ou seja, o comportamento do caudal escoado pela brecha como um descarregador simples no qual o parâmetro área é um parâmetro geométrico deve ser adotada com cautela.

O estudo da hidrodinâmica do escoamento junto à brecha durante a ocorrência de episódios de erosão geotécnica foi realizado analisando o campo de velocidades em pontos específicos do escoamento e a hidrodinâmica do escoamento sobre a brecha.

O estudo da evolução temporal da velocidade local nos intervalos temporais analisados em cada ensaio foi efetuado primeiramente pelo método do PIV, tendo-se chegado à conclusão que este não continha o detalhe que permitiria analisar os fenómenos em estudo. Deste modo, adotou-se o método de PTV na determinação da evolução temporal da velocidade em locais de interesse, tendo-se concluído que o mesmo se revelou muito mais eficiente que o PIV para a análise pretendida. Este método foi determinante para detetar o movimento exato das partículas de esferovite ao longo dos intervalos analisados, em particular, durante a ocorrência de episódios de erosão geotécnica. Observou-se que, associado à ocorrência destes episódios, o campo de velocidades em pontos próximos do local de ocorrência da queda dos blocos, as componentes v_x e v_y da velocidade sofriam alterações, sendo que em alguns casos, o campo de velocidades estabilizava para valores semelhantes aos anteriores e noutros casos, o campo de velocidade acabava por denotar um visível aumento de ambas as componentes em termos gerais.

Em relação à análise da largura do escoamento não separado (ENS) nos vários intervalos estudados observou-se que a mesma não se altera subitamente assim que se dá a queda de um bloco de solo, mas sim gradualmente e que, muitas vezes os episódios de erosão geotécnica não têm potencial para causar impacto no caudal escoado. Acaba por ser o escoamento separado (ES) que assim que ocorre um episódio

de erosão geotécnica, vem ocupar o espaço livre deixado pelo mesmo, só posteriormente e de uma forma mais gradual, quando se processa a erosão hidráulica de determinadas zonas da brecha é que o ENS inicia a ocupação do espaço anteriormente referido, deixado pelo fenómeno de erosão. Por conseguinte, o caudal efluente da brecha acaba por aumentar.

O Kinect Sensor demonstrou-se apropriado para a reconstrução da superfície 3D da forma da barragem de aterro (morfologia da brecha) tendo sido uma fonte de informação acrescida para a caracterização da evolução geométrica da brecha ao longo do tempo, assim como, para comprovar a existência de fenómenos de infraescavação, devido à visualização de cavidades de erosão.

Como foi dito anteriormente, esta tese insere-se num tema de investigação iniciado com a realização de uma tese de doutoramento no qual este trabalho de mestrado se insere. Como tal, existe ainda muito trabalho futuro a ser realizado, do qual se destaca a realização do mesmo tipo de ensaios variando as misturas granulométricas, o perfil transversal das barragens (com zonamento) e os graus de compactação das barragens. Refira-se ainda a necessidade de criar metodologias que tornem o PTV um processo de análise menos complexo e exaustivo e a utilização de equipamentos de medição da resistência dos solos utilizados nos aterros, da quantidade de água percolada no interior do aterro durante o ensaio experimental e da pressão intersticial.

Como nota final refira-se que os resultados aqui apresentados foram um contributo para o aumento do conhecimento dos processos de ocorrência e evolução de brechas em barragens de aterro, em particular no que respeita a compreensão da relação entre os fenómenos de ordem da hidrodinâmica e os episódios de erosão geotécnica presentes no mecanismo de rotura.

Referências Bibliográficas

- Asghari Tabrizi, A., Elalfy, E., Elkholy, M., Chaudhry, M. H., & Imran, J. . (2016). Effects of compaction on embankment breach due to overtopping., 1–12. article. *Journal of Hydraulic Research*.
- Clague, J. & Evans, S. (2000). *A review of catastrophic drainage of moraine-dammed lakes in british*.
- Coleman, S. E. (2002). Overtopping Breaching of Noncohesive Homogeneous Embankments. 128(9), 829–838. *Journal of Hydraulic Engineering*.
- Feliciano Cestero, J. A., Imran, J., & Chaudhry, M. H. . (2014). 14). Experimental investigation of the effects of soil properties on levee breach by overtopping. 1(4), 4014085. article. *Journal of Hydraulic Engineering*.
- Foster et al. (2000). "The statistics of embankment dam failures and accidents. *Canadian Geotechnical Journal*.
- Foster, M. F. ((2000).). The statistics of embankment dam failures and accidents. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(5), 1000–1024.
- Fry, R. F. (2005). "*Internal Erosion of Dams and Their Foundations*".
- ICOLD. (2003). *In 21º ICOLD Congress*. Montreal.
- Jack, R. (1996). The mechanics of embankment failure due to overtopping flow. Ms. Thesis. University of Auckland. New Zealand.
- Johnson & Illes. (1976). "*A review of catastrophic drainage of moraine-dammed lakes in british columbia. Quaternary science reviews*".
- Jónatas, R. J. (Dezembro 2013). "*Rotura de barragens de aterro por galgamento. Ensaios Experimentais com aterros homogéneos*". Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente., Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Departamento de Engenharia Geográfica.
- Leonardo, N. F. (Outubro 2016). "*Hydronamics of a dam breaching by overtopping*". Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico.
- LNEC. (1966). "*Especificação E 196-1966, Solos - Análise granulométrica*".
- Orendorff, B., Al-Riffai, M., Nistor, I., & Rennie, C. D. (2013). Breach outflow characteristics of non-cohesive embankment dams subject to blast , 40(3), 243–253. article. *Canadian Journal of Civil Engineering*.
- Quintela, António Carvalho. (1990). "*ESTRUTURAS HIDRÁULICAS*". Fundação Calouste Gulbenkian.
- R.Lança, T.Costa. (2001). Capítulo 1. Em *Hidrologia de Superfície - Sebenta de hidráulica aplicada*. UAlg.
- Santos, J. B., Franca, M., & Almeida, A. B. (Dezembro de 2007). "Risco associado à ruptura por galgamento de barragens de aterro".

- Santos, J. E. (2016). "Experimental Investigation of failure by overtopping of homogeneous earth dams.". Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.
- Schmocker, L., & Hager, W. H. (2009). Modelling dike breaching due to overtopping, 47(5), 585–597. article. *Journal of Hydraulic Research*.
- Schmocker, L., & Hager, W. H. (2012). Plane dike-breach due to overtopping: Effects of sediment, dike height and discharge, 50(6), 576–586. article. *Journal of Hydraulic Research*.
- Singh, P. (1996). "Dam Breach Modeling Technology.". Louisiana State University, Baton Rouge: U.S.A.: Kluwer academic publishers.
- Tingsanchali, T., & Chinnarasri, C. (2001). Numerical modelling of dam failure due to flow overtopping, 46(1), 113–130. article. *Hydrological Sciences Journal*.
- Umeyama, M., Shintani, T., & Watanabe, S. (2010). "Measurements of Particle velocities and trajectories in a wavecurrent motion using particle image velocimetry."
- Vaskinn, K. A., Lovoll, A., Hoeg, K., Morris, M., Hanson, G., & Hassan, M. (2004). *Physical modeling of breach formation: Large scale field tests. Proceedings of the Dam Safety*.
- Wahl, T. L. (1998). "Predictions of Embankment Dam Breach Parameters." . *Dam Safety Research Report*, 7-10.
- Wahl, T. L. (2004). Uncertainty of Predictions of Embankment Dam Breach Parameters, 130(5), 389–397. *Journal of Hydraulic Engineering* .
- YANG, Y., CAO, S., YANG, K., & LI, W. (2015). Experimental study of breach process of landslide dams by overtopping and its initiation mechanisms, Ser. B, 27(6), 872–883. article. *Journal of Hydrodynamics*.
- Zhao, G., Visser, P. J., Yankai, R. E. N., & Uijttewaal, W. S. J. (2015). Flow hydrodynamics in embankment breach, Ser. B, 27(6), 835–844. article. *Journal of Hydrodynamics*.
- Zhu, Y., Visser, P. J., Vrijling, J. K., & Wang, G. (2011). Experimental investigation on breaching of embankments, 54(1), 148–155. article. *Science China Technological Sciences*.